

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

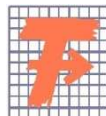
Diplomová práce

Liberec 2009/2010

Zdeněk Podrazil

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Studijní program: N3108 Průmyslový management

Studijní obor: 3106T013 Management jakosti

Digitalizace textilních porézních struktur za účelem počítačové simulace transportních jevů

Porous structures digitalization for the purpose of a computer simulation of transport phenomena

Zdeněk Podrazil

KHT-009

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Larisa Ocheretna

Rozsah práce:

Počet stran textu... 64

Počet obrázků..... 46

Počet tabulek..... 6

Počet grafů 0

Počet stran příloh . 3

Zadání

1. Zpracujte rešerši v oblasti porézních materiálů. Zaměřte se na jejich rozdělení, charakteristiky, metody a nástroje pro kvalitativní popis porézních struktur.
2. Rozeberte problematiku počítačového modelování transportních jevů porézními prostředími. Věnujte se přístupům pro označení porézní struktury v algoritmech pro simulaci transportních jevů.
3. Navrhněte postup pro digitalizaci textilního porézního materiálu. Vytvořte algoritmus pro získání jeho binárního obrazu a zjištění základních charakteristik porézní struktury.
4. Analyzujte univerzálnost navrhnutého postupu vzhledem k měřítku textilní porézní struktury, případně tisku a finálním úpravám. Navrhněte směry, kterými se v této problematice je možné do budoucna ubírat.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená *diplomová (bakalářská)* práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním *diplomové (bakalářské)* práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou (*bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové (*bakalářské*) práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové (*bakalářské*) práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové (*bakalářské*) práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci dne 25. 3. 2010

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce – Ing. Larise Ocheretne za cenné připomínky a kvalifikované rady při realizaci mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat všem lidem, u kterých jsem hledal radu a pomoc. Také děkuji své rodině za podporu během studia.

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá studiem textilních porózních struktur. V teoretické části je popsáno, co je porózní medium, co je to porózita a zaplnění v textilních útvarech a také, jak se člení póry dle velikosti. Práce ukazuje způsoby analýzy porózity u porózních textilních materiálů. Jsou zde popsány software, kterými se modeluje proudění tekutin skrz porózní struktury a software, kterými se modeluje stavba textilní porózní struktury. V práci je popsán algoritmus, kterým se dá zjistit porózita obecné zkoumané struktury. Tento algoritmus je dále modifikován konkrétně na textilní porózní strukturu. V praktické části je popsán princip získání digitální fotografie textilní porózní struktury. Je popsáno obrazové stanovení uspořádání vláken v textilní struktuře. Analyzuje se a vyhodnocuje se porózní textilní struktura z pohledu (např. pro stanovení zakrytí tkaniny Z) a pro studium vnitřní struktury se tvoří řezy analyzované textilní struktury. Práce se proto také zabývá problematikou tvorby řezů porózních textilních struktur. K vyhodnocení a získání porózní textilní struktury je použito mikroskopických metod (optické mikroskopie, elektronové mikroskopie, počítačové tomografie) a také obrazové analýzy. Výsledkem práce je navržený postup k získání přibližné vnitřní struktury textilního materiálu – konkrétně netkané textilie. Získaný binární obraz lze použít v algoritmu určeného pro simulaci transportních jevů porózními strukturami.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Porózita, stanovování porózity, provádění řezů porózních textilních struktur, digitalizace textilní porózní struktury.

ANNOTATION

This diploma thesis is engaged in studies of porous materials. In theoretical part it is described what the porous medium, porosity and saturation in textile materials are and also how porous media are divided by their sizes. The work shows the ways for the porous textile structures analysis. There is described software for the flow through porous structures modeling and for the textile porous structure building. There is described an algorithm for porosity evaluation of common investigated structure. This algorithm is further modified concretely for the textile porous structure. In practical part there is described the principle of realizing the digital textile porous structure photography. There is described a spatial fibers arrangement in textile structure. The textile porous structure is analyzed and evaluated from the view (e.g. for cover definition of fabric) and slices of analyzed textile structure are created for examination of inner structure. Therefore the work also deals with the problems including slices of the porous textile structures. The microscopic methods (optical, electron microscopy and computer tomography) and image analysis are used for evaluating and gaining results of the porous textile structure. The result of this diploma thesis is the designed progress to gain of approximate inner textile structure concretely the inner structure of nonwoven textile. It is possible to use the gained binary image for algorithm dedicated to porous structures transport phenomena simulations.

KEY WORDS:

Porosity, the means of determination of porosity, cut-execution of porous textile structures, digitalization of the textile porous structures.

OBSAH

Úvod	9
1 Teoretická část.....	10
1.1 Porózní medium	10
1.1.1 Poróznost v textilních útvarech	12
1.1.2 Zaplnění u vláknenného útvaru.....	17
1.1.3 Tvar póru.....	17
1.1.4 Klasifikace rozměrů pórů.....	18
1.1.5 Objemová definice zaplnění	20
1.1.6 Plošná definice zaplnění	20
1.1.7 Hustotní definice zaplnění	21
1.1.8 Poróznost	21
1.1.9 Kružnicovost a tvarový faktor	21
1.1.10 Problém stanovení průměru průřezu.....	22
1.1.11 Problém stanovení průřezu póru	23
1.2 Nepřímé stanovení poróznosti	24
1.2.1 Stanovení místa největšího póru bublinkovou metodou (bubble point test) .	24
1.2.2 Stanovení poróznosti technických materiálů rtuťovou metodou.....	25
1.2.3 Metoda heliové poróznosti	26
1.3 Počítačové modelování transportních jevů porózním prostředím.....	28
1.3.1 Transportní jevy	28
1.3.2 COMSOL.....	29
1.3.3 ANSYS FLUENT	30
1.3.4 Software pro tvorbu reálných textilních struktur (tkaniny)	31
1.4 Charakteristiky porózní struktury získané metodou obrazové analýzy	33
1.4.1 Příprava řezů zkoumané struktury	33
1.4.2 Získání prahu T, kterým se binarizuje šedý obrázek	33
1.4.3 Práce se získaným obrazem, kalibrace a vyhodnocení	35
1.5 Digitální reprezentace obrazu	35

1.5.1	Počítačové uložení obrazu	36
1.5.2	Vyhodnocování vlastností a charakteristik v digitálním obraze	37
1.5.3	Princip snímání digitálního obrazu	40
2	Praktická část	42
2.1	Stanovení zakrytí tkaniny	42
2.2	stanovení vnitřní struktury	45
2.3	Popis parametrů zkoumané NT PERVIN 40	49
2.4	Zjištění parametrů zkoumané netkané textilie vážením vzorků	49
2.5	Stanovení prodyšnosti plošné textilie pro vzduch	50
2.6	Stanovení porózy/zaplnění tkaniny PERVIN 40 přístrojem METEFEM	52
2.7	Popis určení směrové orientace vláken zkoumané netkané textilie PERVIN 40 ..	53
2.7.1	Stanovení orientace vláken obrazovou analýzou	55
2.7.2	Zjištěná směrová orientace na základě obrazové analýzy	55
2.8	Postup tvorby řezu	57
2.9	Druhy metod k vyhodnocení vnitřní struktury vzorku	58
2.9.1	Optická mikroskopie – pozorování pod dopadajícím světlem	59
2.9.2	Pozorování na konfokálním rastrovacím mikroskopu	60
2.9.3	MICRO-CT analýza	62
2.9.4	Elektronová rastrovací mikroskopie	64
2.10	Výsledek digitalizace reálné textilní struktury	65
2.11	Diskuse použitého postupu digitalizace	69
3	Porovnání charakteristik zkoumané textilní struktury různými metodami	70
	Závěr	72

ÚVOD

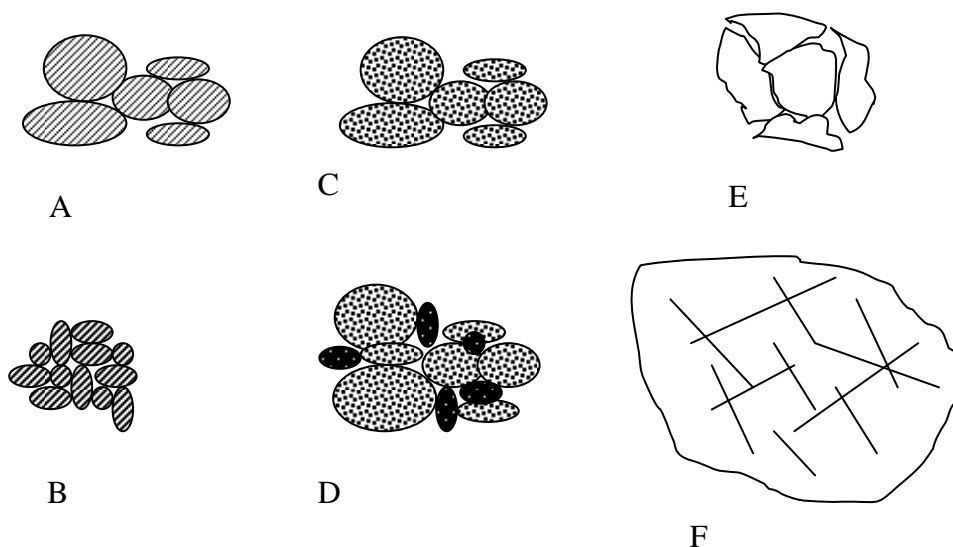
Práce se zabývá vizualizací textilních porózních struktur a metodami k získání informací o jejich skutečné vnitřní stavbě nebo také uspořádání. Jedná se o aktuální téma, které má v dnešní době značný význam – např. pro odvětví zkoumání vícevrstvých textilií (materiálů), apod. K řešení problémů podobného rázu jako jsou řešeny v práci je totiž nutná technika v podobě počítačů, různých mikroskopů, nanotomografů, speciálních zařízení na vytváření mikroskopických řezů, apod. Proto se těmito problémy donedávna mnoho autorů nezabývalo. V teoretické části je popsáno, co je porózita, jak se stanovuje – ať už přímo či nepřímo, práce ukazuje, jak je možné popsat poróznost, zaplnění a charakteristiky rozměrů pórů. Je rozebrán souhrn kroků vedoucích k získání skutečné binární struktury, a jak je se získaným obrazem v počítači pracováno. Jsou popsány i způsoby modelování proudění v porózních strukturách v moderním software. Ve většině software je však použit pouze model a nikoli reálná struktura. Proto se práce zaměřuje na vizualizaci reálné textilní struktury. Skutečná struktura má pak sloužit jako náhrada za někdy používanou náhodně generovanou textilní strukturu a posloužit k simulacím nebo zjišťování fyzikálních vlastností apod. Postup vizualizace použitý v práci může umožnit např. lepší predikci vlastností jak jednovrstvých textilních struktur, tak i vícevrstvých. Textilní struktury je možné zkoumat jednak z pohledu – a stanovit tímto způsobem charakteristiky jako např. zakrytí tkaniny, nebo je možné zkoumat vnitřní strukturu, a k tomuto účelu je potřeba provádět řezy zkoumaných textilních struktur. Z jednotlivých řezů zkoumaných struktur lze pak např. odhadnout charakteristiky, jako jsou porózita a zaplnění. V praktické části byly zkoumány charakteristiky vzorku z pohledu – byla volena tkanina, u které bylo stanoveno zakrytí. K analýze vnitřního uspořádání sloužily vzorky netkaných textilií. Tkaniny a pleteniny nebyly zkoumány z hlediska vnitřního uspořádání, protože mají zpravidla větší zaplnění oproti netkaným textiliím a neumožní vidět v řezu otevřený průchozí pór. Oproti tomu netkané textilie umožní obvykle vidět právě průchozí pór. V práci tedy byla mimo jiné prozkoumána a digitalizována vnitřní struktura chemicky spojené netkané textilie. V práci je popsán možný způsob, jak provést řez zkoumanou textilní strukturou a jak získaný řez digitalizovat a vyhodnotit. Digitalizací vnitřní struktury velice porózních textilií se mnoho autorů nevěnuje z důvodu obtížně získatelných řezů zkoumaných vzorků, proto je práce přínosná – např. je zde ukázáno, jak by bylo vhodné právě vnitřní strukturu textilního porózního materiálu stanovit.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Tato kapitola je věnována, mimo jiné, popisu porózních textilních struktur, jsou zde uvedeny způsoby, jak stanovit poróznost nepřímo. Je zde uveden postup, jak digitalizovat obecnou porózní strukturu a jak následně počítačově zpracovat získanou informaci. Je zde i rozebrána problematika počítačového modelování transportních jevů porózními prostředím v moderním software.

1.1 Porózní medium

Porózní medium dle (1) se popisuje a je možno ho interpretovat různými způsoby. Příklady porózních materiálů mohou být: *půdy, porózní nebo rozpukané skály, keramika, papír, pískové filtry, porózní katalyzátory, mezi jiné sem patří i shluky vláken, délkové a plošné textilie nebo i krajíc chleba*. Méně zřejmé příklady, které ale spadají do této skupiny, mohou být např. *krasové vápencové útvary*, kde mohou být různé kanály a jeskyně, u kterých se mění jejich vzájemné velikosti a vzdálenosti dutin. Všechny tyto materiály mají jedno společné – mohou být klasifikovány jako *porózní media*. Z počátku je možno pokusit se popsat porózní médium jako „pevné těleso s dírami“. Avšak dutá kovová trubka nebude zřejmě normálně klasifikována jako porózní medium, rovněž tak pevné těleso s izolovanými dírami nebo póry nebude porózním médiem. Je nutné si spojit takováto tělesa s tokem tekutiny přes ně. Dále je možné pokusit se zlepšit definici dohodou, že póry propojují alespoň několika průchozími cestami porózní těleso z jedné strany na druhou a tyto průchozí cesty jsou rozděleny v porózním médiu buď pravidelně, nebo náhodně. Ačkoli je takto popsán přijatelný model porózního media, takovýto popis postrádá možnost výměny tekutiny mezi *přiléhajícími cestami (póry)* a také prostorový pohyb tekutiny všemi směry uvnitř porózního media. Například obrázek 1 ukazuje různé typy porózních hornin.

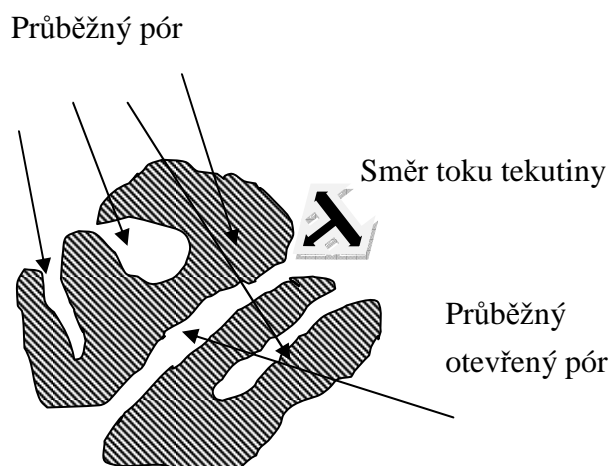


Obrázek 1: Typy mezer ve skalních útvech dle(2). A ložisko o velké porózitě; B ložisko o malé porózitě; C ložisko z porózních materiálů; D ložisko se sedimentem; E póry vzniklé rozpouštěním; F póry vzniklé zlomem.

Shrnutím výše uvedených předběžných postřehů, je možno definovat porózní médium jako:

- Část prostoru, která je obsazena různorodou nebo vícefázovou hmotou. Alespoň jedna z fází v této hmotě není pevná. Tyto fáze mohou být plynné či kapalné. Pevná část se nazývá *matrice* a prostor, který není obsazen pevnou částí (matricí) se nazývá *prázdným místem (pórem)*.
- Pevná část by měla být rozložena v porózním prostředí rovnoměrně ve srovnání s prázdnými místy – pevná část musí být přítomna v každém základním reprezentativním objemu. Podstatnou vlastností porózního media je, že jeho specifický povrch pevné části je relativně velký. Tento velký specifický povrch ovlivňuje v mnoha ohledech chování tekutin v porózních materiálech.
- Alespoň některé z pórů by měly být propojeny. Prostor propojených pórů se někdy nazývá *efektivní velikost póru*. Určitá část spojených porózních prostor může být

považována za tzv. neefektivní – jedná se o tzv. mrtvé konce (dead end). Obrázek 2 ukazuje různé členění typů pórů z hlediska jejich dostupnosti dle (3).



Obrázek 2: Tzv. dostupnost pórů dle (1), šipka označuje směr toku tekutiny.

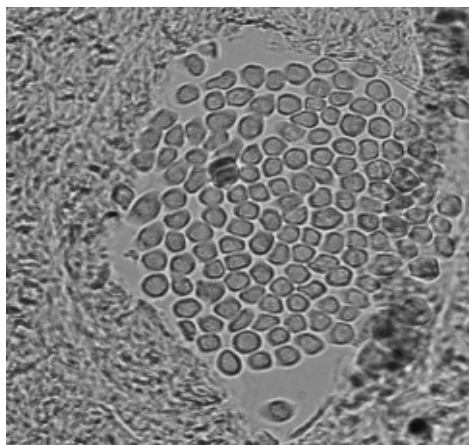
Těmito uzavřenými póry nelze totiž realizovat tok veškeré tekutiny. Uzavřený pór je relativní pojem, pro jeden typ velkých molekul je nedostupný a pro jiný typ molekul (např. helium) je dostupný. Tento typ pórů by měl být nazýván *pórem latentním* dle (3).

- Dále záleží i na distribuci velikosti pórů, objemu makropórů, kontinuitě pórů a možných dalších parametrech. (Vzájemné prostorové uspořádání pórů a částic v porózním materiálu se někdy také nazývá *texturou* – pojem textura obecně značí složitou strukturu dle (4)). Textilní struktury jsou také porózní. Pór je nejen v prázdných místech např. tkaniny, ale i ve vlastních délkových textiliích, kterými je např. tkanina tvořena.

1.1.1 Poróznost v textilních útvarech

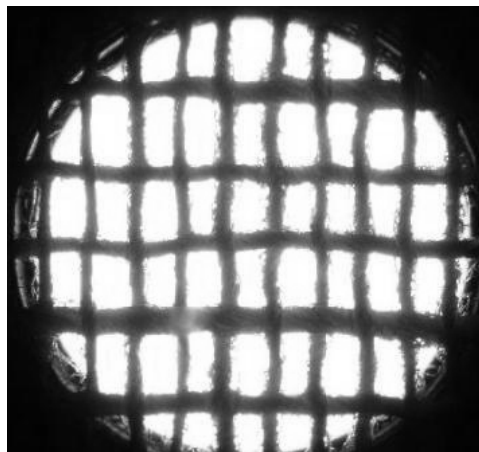
Výše byla popsána poróznost v materiálech obecně. Nyní bude popsána poróznost v textiliích. Textilní útvary jako např. *příze, tkaniny, pleteniny, netkané textilie* – tedy *délkové a plošné textilie* mají jednu společnou vlastnost a to, že nejsou plně zaplněné, ale obsahují místa, kde je materiál (vlákno) a kde nic není – je pór. Tkaniny, pleteniny i netkané textilie jsou

charakterizovány různou porózitou (popř. zaplněním) a odlišnou pravidelností struktury. Zpravidla nejmenší pravidelnost struktury a největší porózu vykazuje netkaná textilie oproti tkaninám či pleteninám. U netkaných textilií nelze vytvořit jedinečný model, který by jejich porózu popisoval, proto je nutné je zkoumat. Ukázky textilních porózních struktur jsou k nahlédnutí na obrázku 3-7. Obrázek 3 ukazuje řez polypropylenovou přízí, zalitou ve vosku. Z obrázku je patrné, že vlákna, která tvoří tělo příže, obsahují mezi sebou mezery – póry.



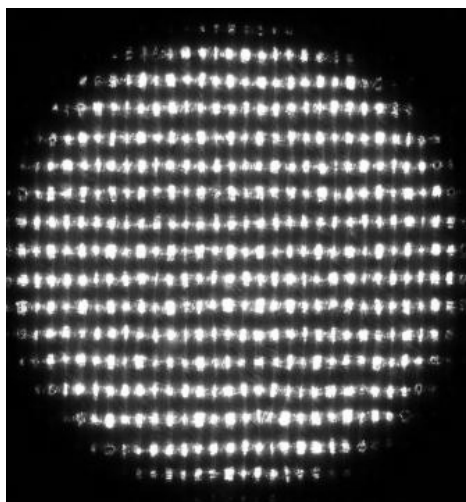
Obrázek 3: Řez BD přízí, 25 tex, 100% PP, zvětšeno 250× dle (5).

Tkanina sama o sobě také obsahuje mezery – póry. Velikost pórů (prázdných míst mezi nitěmi a mezivláknenné póry) záleží na dostavě tkaniny (počet nití na jednotku délky), vazbě tkaniny (základní vazby: plátno, kepr, atlas), na typu použitých přízí v osnově a útku (*příže vs. monofil/multifil*), na konečné úpravě tkaniny (*kalandrování* apod.) Obrázek 4 ukazuje tkaninu organtýn (řídká tkanina v plátnové vazbě). Tkanina má nízkou dostavu a proto má i malé zakrytí Z – obsahuje velké množství pórů (zakrytím se rozumí plocha zakrytá strukturou k ploše celku).



Obrázek 4: Tkanina organtýn v procházejícím světle, 12,5× zvětšeno, male zakrytí Z.

Tkanina o větší dostavě než tkanina v předchozím příkladu bude mít pak i větší zakrytí Z. Obrázek 5 ukazuje tkaninu v husté plátnové vazbě – popelín, který vykazuje větší zakrytí Z než předchozí tkanina.

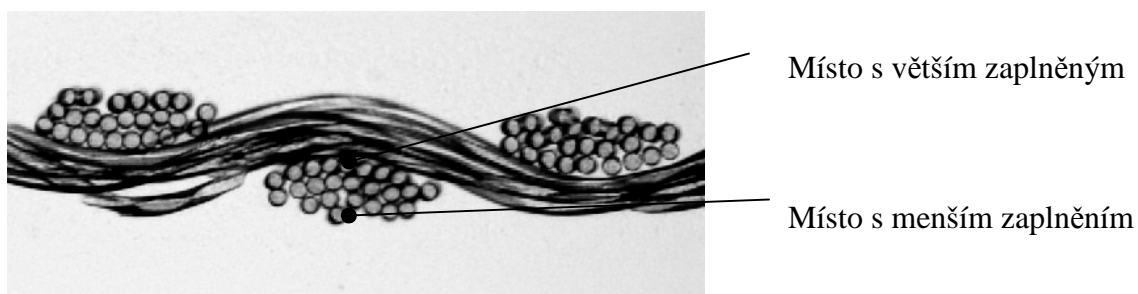


Obrázek 5: Tkanina popelín v procházejícím světle, 12,5× zvětšeno, větší zakrytí Z.

Struktura (velikost a rozložení póru) je nutné sledovat v prostoru a nikoli pouze v pohledu, protože textilní útvary jsou 3D. Nedostačuje informace o plošném rozložení – nutnost zkoumání řezů.

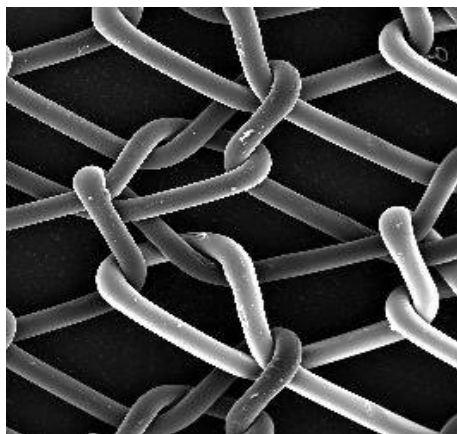
Na obrázku 6 je řez tkaninou vyrobenou z multifilů v plátnové vazbě. Z obrázku plyne důležitý závěr, že při tvorbě struktury (např. plošné textilie) dochází vlivem vazných sil k zploštění původně kruhových přízí do tvaru elipsy. Zaplnění příze se vlivem vazné síly změní oproti nezatížené přízi a to tak, že v místě dotyku přízí (na okraji) jsou elementární

vlákna příze bez mezer stejně jako v ose příze (u nezatížené příze je zaplnění největší v ose a směrem k okraji klesá).



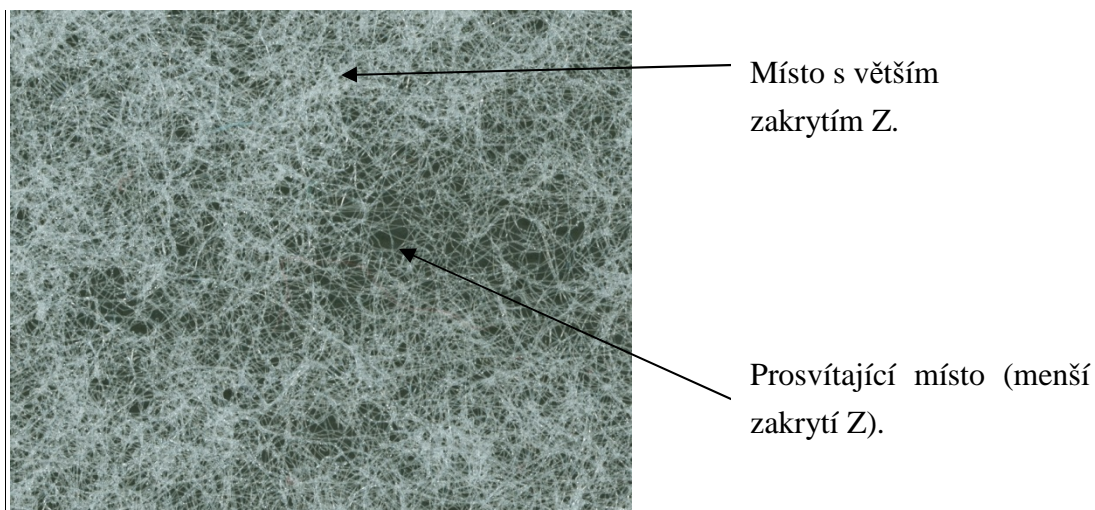
Obrázek 6: Řez tkaninou z multifilu dle (5).

U pletenin platí v zakrytí Z analogie jako pro tkaniny Vliv na zakrytí Z má vazba a typ použitých délkových textilií. Obrázek 7 ukazuje pleteninu, která se používá jako nosný prvek v lékařství (fixace orgánů).



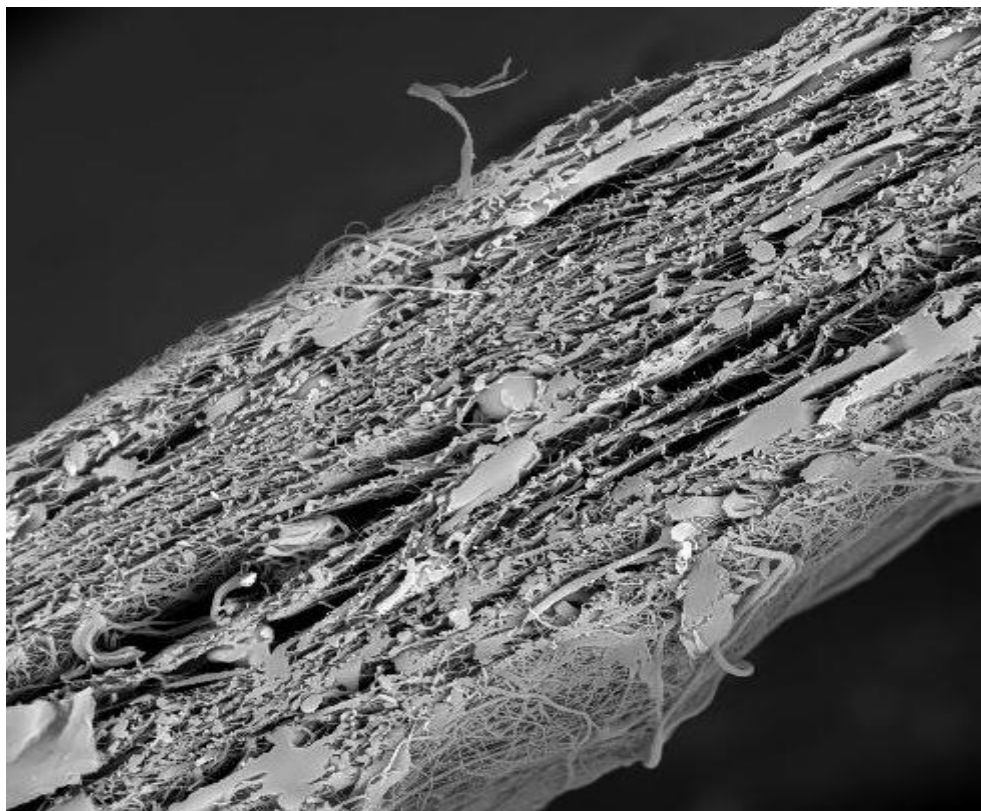
Obrázek 7: Pletenina – malé zakrytí Z dle (5).

Další textilní struktura, kterou je možno zkoumat je netkaná textilie. Netkaná textilie (NT) (5) je obecně charakterizována nepravidelnou strukturou a větší mírou neuspořádání oproti přízím, tkaninám a pleteninám. NT je určena použitými vlákny (jemnost, materiál, průřez, apod.), způsobem získání vlákenné vrstvy (sejmutí pavučiny z mykacího stroje apod.) a zpevněním vlákenné vrstvy (metodou vpichování, termické pojení, apod.). Např. ve struktuře NT vyrobené technologií *melt-blown* (6) lze nalézt místa, která jsou méně zaplněna než místa jiná. Obrázek 8 ukazuje tento problém nestejného zaplnění ve struktuře NT označované PETEX.



Obrázek 8: NT vyrobená technologií termického pojení (PETEX) a označení nepravidelnosti struktury.

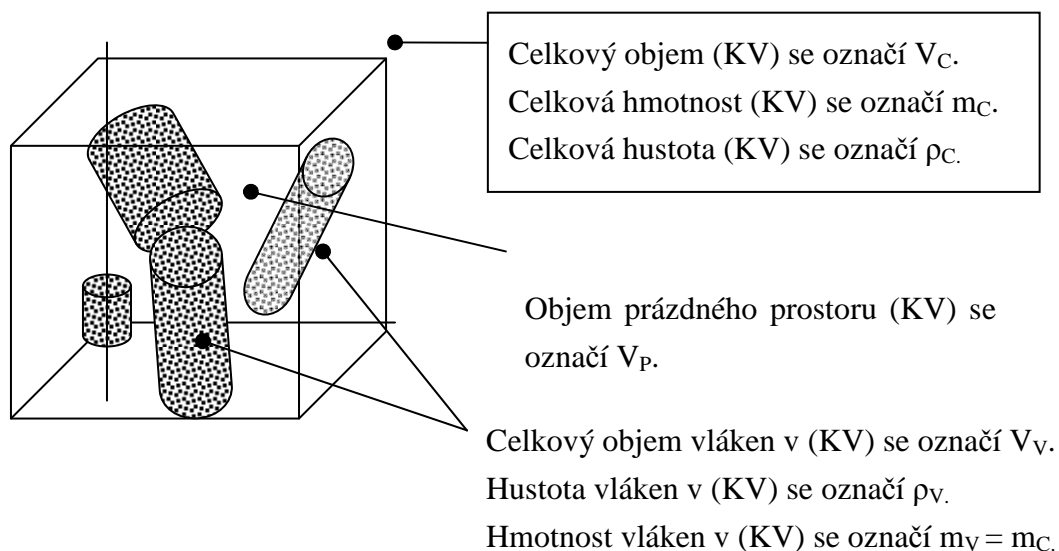
Vlivem nestejnoměrného rozptýlení vláken v ploše NT je možné očekávat problém např. při filtraci. Místa, kde nejsou vlákna tak kumulována, může snadněji dojít k průletu zachytávaných částic. Obrázek 9 ukazuje řez melt-blown vrstvou.



Obrázek 9: Řez melt-blown vrstvou o síle cca 0,1 mm, na obrázku patrné proměnlivé zaplnění v různých vrstvách dle (7).

1.1.2 Zaplnění u vlákenného útvaru

Textilní struktury jsou složité a jsou obvykle nestálých tvarů. Zkoumání jejich vlastností má přímý vztah se zjištěním jejich struktury, např. pro vícevrstvé struktury je nutné znát jejich vnitřní uspořádání. Existují teorie (modely), které popisují strukturu textilních materiálů. Proto je nutné definovat charakteristiky vlákenných struktur. V předchozí pasáži bylo popsáno, co je *porózní medium*, byly ukázány *druhy textilních struktur*, kde se vyskytují různé druhy prázdných míst – pórů. Cílem práce je zkoumání porózy u textilních struktur, stanovení následujících charakteristik porózních materiálu se vztahuje právě k textilním útvarům. Textilní vlákenný útvar je možno považovat za jeden z druhů porózního materiálu. Pak je potřeba definovat, jakou část z objemu struktury zaujímají tělesa (vlákna) a jakou část zaujímá prázdný prostor (pór), tedy zaplnění (8). Obrázek 10 ukazuje model vlákenného útvaru v podobě krychlového výřezu (KV).

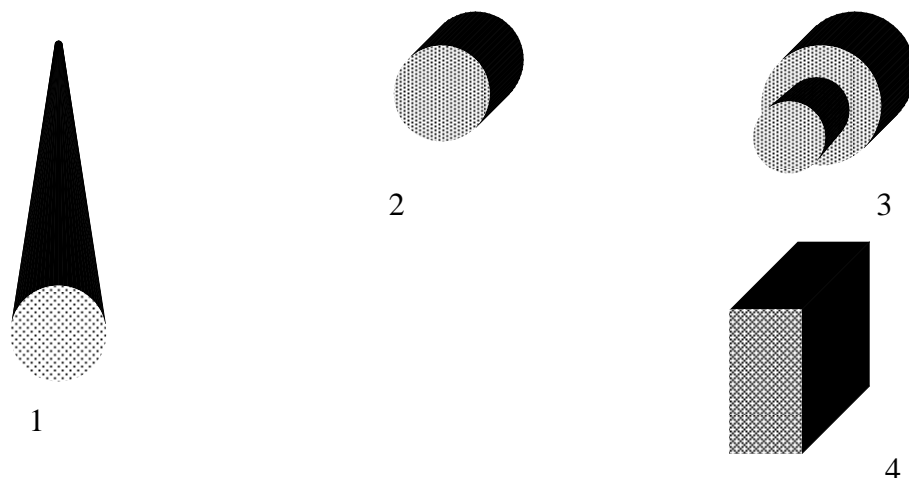


Obrázek 10: Charakteristika a popis modelu vlákenné struktury.

1.1.3 Tvar póru

Samozřejmě póry nejsou ve strukturách nikdy určitého tvaru, proto se zavádí tvarové zjednodušení. Obrázek 11 ukazuje zjednodušené a schematické podání tvarů pórů ve skutečných strukturách. Póry se od sebe navzájem liší tvarem i rozměrem. Tyto tvary jsou zpravidla složité a obtížně popsatelné – proto se zjednodušují vhodnými modely. V (9) se

předkládají modely jako: *válec*, *destička (štěrbina)*, *kužel* a *inkoustová lahvička*. (10) uvádí rovněž možný zjednodušený tvar póru *kulovitý* (nezobrazen).



Obrázek 11: Tvary pórů – 1 kuželovitý; 2 válcový; 3 tvar inkoustové lahvičky; 4 deskovitý dle(11).

1.1.4 Klasifikace rozměrů pórů

Protože se materiály, které mají stejnou poróznost ψ , ale mají jinou velikost pórů, chovají se jinak, je nutné velikost pórů nějakým způsobem kvalifikovat, např. dle (10). Je zřejmé, že se lehce stanoví rozměr póru pro modelové situace – viz výše uvedené zjednodušené tvary. Ve zdroji (9) se uvádí pro: *válcové tvary* se použije průměr válcové části, pro *deskový typ* se použije vzdálenost stěn, pro *puklinový typ pórů* (nezobrazen) se použije nejmenší šíře pukliny a pro kapilární průřez obecného tvaru se použije tzv. *ekvivalentní průměr póru* (viz dále). Dělení pórů dle jejich velikostí je k nahlédnutí v tabulce 1.

Tabulka 1: Třídění velikostí pórů podle různých odvětví použití dle (10).

	Přehled třídění pórů podle jejich velikosti.					
	Definované typy pórů, d <i>nm</i> .					
Odvětví	Makro pór	Mezo pór	Mikro pór	Super mikropór	Ultra mikropór	Sub mikropór
IUPAC	>50	50-2	<2	2-0.7	>0,7	>0.4
Dubinín	>400-200	400-200 až 3-3.2	<1,4-1.2	3.2-3 až 1.4-1.2	NA	NA
Cheremskoj	>2000	NA	2000 až 200	NA	>4-2	>0.2
Kodikara	10⁶-10⁴	NA	3*10⁴-10³	10³-25	>4-3	NA

Z tabulky plyne, že se odvětví v klasifikaci velikostí pórů silně liší – tato difference je způsobena různým přístupem v odlišných odvětvích (např. geologie vs. chemické procesy katalyzátorů – terminologie dle IUPAK (12), aj.).

Dnes se obvykle klasifikuje velikost pórů dle Dubinina (10). Jednoduchý přehled udává tabulka 2.

Tabulka 2: Typologie dělení pórů dle jejich velikostí dle (10).

Třídění velikostí rozměru pórů d <i>nm</i> dle Dubinina.	
Mikropóry	< 2 <i>nm</i>
Mesopóry	2 <i>nm</i> – 50 <i>nm</i>
Makropóry	> 50 <i>nm</i>

1.1.5 Objemová definice zaplnění

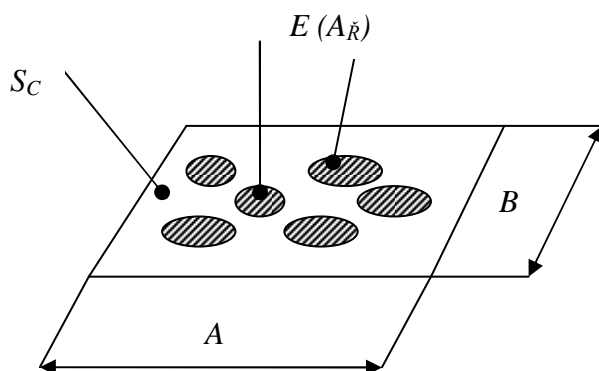
Aby bylo možno charakterizovat, jakou část objemu porózního vzorku tvoří póry a jakou část tvoří plná místa, je nutné zavést pojmy zaplnění a porózita. Objemovou definici zaplnění μ_v je možno definovat jako podíl objemu např. vláken ku celkovému objemu. *Objemová definice zaplnění μ_v dle (8) vychází z předpokladu, že část krychlového výřezu V_C zaujímá pevná část (např. vlákna; celkový objem vláken V_V), zbytek krychlového výřezu V_C je prázdný prostor V_P . Z rovnice (1) je patrné, že pokud se nebudou v celkovém elementárním objemu V_C nacházet žádná pevná tělesa (např. vlákna), pak bude celkový elementární objem V_C prázdný a zaplnění μ bude pak nulové a porózita bude 100%.*

$$\mu_v = \frac{V_V}{V_C} \quad \mu_v \in \langle 0,1 \rangle \quad (1)$$

1.1.6 Plošná definice zaplnění

Jako existuje objemová definice zaplnění μ_v , můžeme zaplnění definovat jako *plošné zaplnění μ_s dle (8)*. Stačí z 3D přejít do 2D. *Rovina R o plošném rozměru $A \times B = S_C$. Její tloušťka se zanedbá. Rovina obsahuje pevné *elementy E (průřezy vláken)*. Souhrnná plocha těchto elementů E činí $A_{\check{R}}$. Plošné zaplnění μ_s je pak definováno jako podíl plochy elementů $A_{\check{R}}$ k celkové ploše S_C , jak uvádí rovnice (2)*. Obrázek 12 vysvětluje význam veličin.

$$\mu_s = \frac{A_{\check{R}}}{S_C} \quad \mu_s \in \langle 0,1 \rangle \quad (2)$$



Obrázek 12: Plošná definice zaplnění.

1.1.7 Hustotní definice zaplnění

Hustotní definice zaplnění μ_p dle (8) se vztahuje k elementárnímu prostoru o objemu V_C a hmotnosti m_C . Tento prostor je (částečně) vyplněn vlákny o hustotě ρ_V . Pak *hustotní definice zaplnění* μ_p , vyjádřená rovnici (3), se získá jako podíl *hustoty vláknenného útvaru* ρ_{VU} k *hustotě vláken* ρ_V .

$$\mu_p = \frac{\rho_{VU}}{\rho_V} \quad (3)$$

Kde ρ_{VU} se vypočítá dle rovnice 4.

$$\rho_{VU} = \frac{m_{\text{vláken}}}{V_C} \quad (4)$$

Kde $m_{\text{vláken}}$ je hmotnost vláken v elementárním celkovém objemu V_C .

1.1.8 Poróznost

Doplňkem k zaplnění je pak poróznost. Elementární prostor o objemu V_C je vyplněn vlákny o objemu V_V . Zbývá prázdný prostor o objemu V_P (póry). *Poróznost* ψ dle (8) je pak vyjádřena např. jako podíl *objemu pórů* V_P k *objemu celkovému* V_C dle rovnice (5).

$$\psi = \frac{V_P}{V_C} \quad (5)$$

Jako zaplněním μ charakterizuje zaplněný prostor, pak porózitou ψ se stanoví prázdný prostor uvnitř elementárního prostoru. Odtud tedy plyne vztah mezi porózitou ψ a zaplněním μ dle rovnice (6).

$$\psi = 1 - \mu \quad (6)$$

1.1.9 Kružnicovost a tvarový faktor

Definice dalších pojmů, které popisují např. tvar póru, jsou uvedeny níže.

Kružnicovost c_K se definuje dle rovnice (7).

$$c_K = \frac{O_V}{O_{SP}} \geq 1 \quad (7)$$

Kde O_V je obvod skutečného průřezu vlákna a O_{SP} je obvod ekvivalentního kruhového vlákna, které má stejnou plochu příčného řezu. Je patrné, že čím bude průřez vlákna členitější, tím bude hodnota c_K růst.

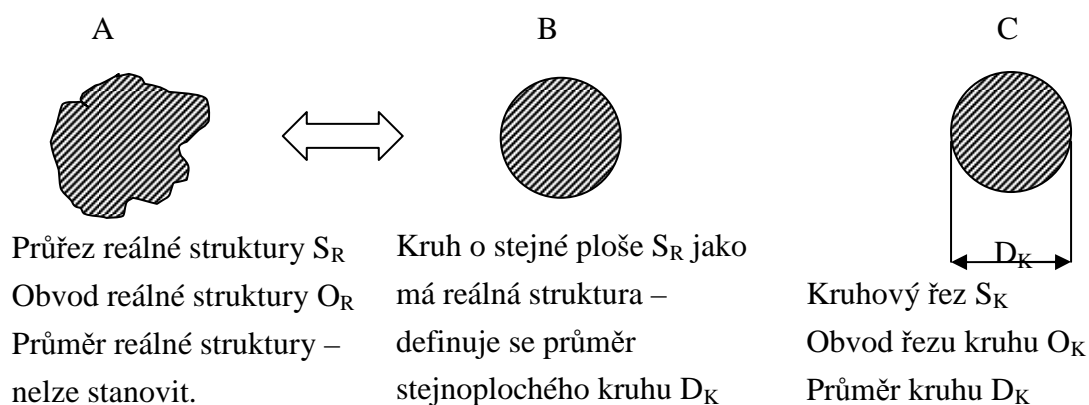
Tvarový faktor q se pak definuje dle rovnice (8).

$$q = \frac{O_V}{O_{SP}} - 1 \quad (8)$$

Kde O_V je skutečný obvod průřezu vlákna a O_{SP} je obvod myšleného kruhu dle (8). *Tvarový faktor q pro ideální kruh je 0, pro rovnostranný trojúhelník je 0,29, pro bavlnu cca. 0,3...*

1.1.10 Problém stanovení průměru průřezu

Obrázek 13 ukazuje stanovení průměru např. reálného vlákna dle (8).



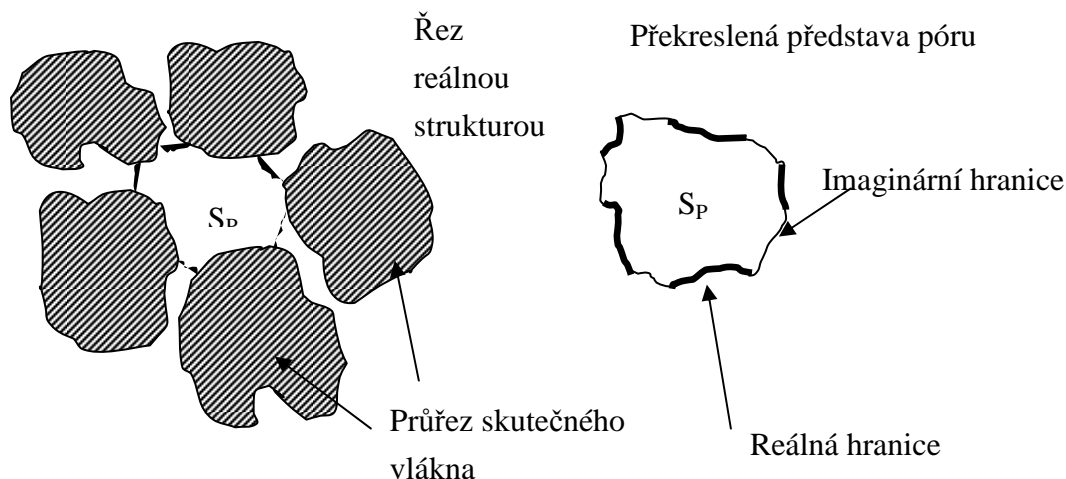
Obrázek 13: Stanovení vztahů mezi obvody a plochami reálného vlákna (A) a stejnoplochého kruhu (B) a zobrazení průměru stejnoplochého kruhu (C)

Průměr stejnoplochého kruhu se definuje podle rovnice (9).

$$D_K = \sqrt{\frac{4 \cdot S_R}{\pi}} \quad (9)$$

1.1.11 Problém stanovení průřezu póru

Obrázek 14 ukazuje skutečnou strukturu např. vláken v řezu. U skutečného vlákna se dá díky jeho uzavřenému tvaru průřezu stanovit jaký má *obvod*, *plochu průřezu* apod. Pór však není obvykle uzavřeného tvaru (předpoklad je, že se skutečná vlákna nedotýkají). Proto byl zaveden pojem *imaginární hranice* dle (8), která zacelí prostory mezi vlákny.



Obrázek 14: Obvod póru a řez skutečnou strukturou – definování imaginární a reálné hranice póru.

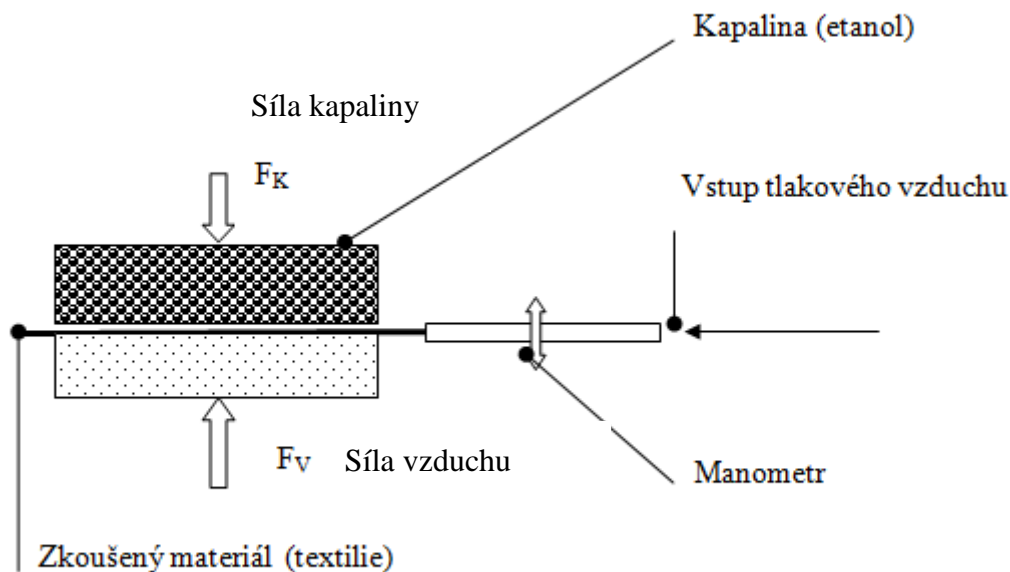
Obvod průřezu póru je proto dle (8) tvořen jen délkou reálné hranice, imaginární hranice jsou pouze myšlené a neexistují. Proto obvod průřezu póru může být vlivem imaginárních hranic i *menší* než je obvod stejnoplochého kruhu (jinak obvod skutečné struktury – např. vlákna je téměř vždy větší, než je obvod stejnoplochého kruhu).

1.2 Nepřímé stanovení porózy

Jak bylo již řečeno výše – struktura útvaru má vliv např. na transportní jevy skrz textilie. Parametry textilní struktury se dají určit např. výpočtem z pořízených řezů zkoumané textilie, modelováním nebo nepřímými metodami stanovení porózy. Např. na katedře NT TUL (6), kde se zabývají navrhováním a používáním netkaných textilií ve filtrech a speciálních aplikacích na odlučování všeho různého, testují porózu nepřímo pomocí tzv. *bublíkové metody*, testují *prodyšnost vzduchu skrz textilní útvary* nebo *stanovují propustnost textilie pro kapalinu*. Dalším způsobem nepřímého stanovení porózy nepřímě určené pro textilní materiály, se nazývá *rtuťová metoda* nebo metoda určení porózy *heliovou metodou*. V podstatě se dá dle (13) říci, že nepřímá metoda stanovení porózy spočívá v prosévání definovaných částic skrz textilií nebo se využívá různých povrchových napětí kapalin a stanovuje se úhel smočení, apod. Velikost póru se stanovuje nepřímo.

1.2.1 Stanovení místa největšího póru bublinkovou metodou (bubble point test)

Bubble point test dle (14) (13) slouží k nalezení největší díry (póru) v zkoumaném materiálu. Dále se testem dá stanovit objemový tok skrz zkoumaný materiál (např. textilií). Bublíková metoda byla vyvinuta proto, že bylo nutné stanovit největší otvory v zkoumaném materiálu. Je totiž zcela zbytečné stanovovat např. průměrnou velikost póru v zkoumaném materiálu, když má být materiál použit např. jako filtr. Je zřejmé, že průměrně velké otvory (póry) zachytí všechny částice, které budou větší než je velikost póru. Ale pokud nějakým rozumným způsobem nebude stanoven potenciálně největší pór, pak i když průměrně velké póry budou odlučovat částice, které mají být odloučeny, ale tyto částice si najdou cestu právě místem největšího póru a schopnost filtrace bude klesat. Princip bublinkové metody k zjištění největšího póru ukazuje obrázek 15.



Obrázek 15: Princip bublinkové metody.

1.2.2 Stanovení porózy technických materiálů rtuťovou metodou

Rtuťová porozimetrie dle (15) je metoda, kterou se stanovují texturní charakteristiky pevných látek. Tato metoda je využitelná především pro stanovení objemu pórů u materiálů, jako jsou keramické a stavební materiály (cihly, beton), práškové materiály (získané slinováním) – v chemickém průmyslu např. katalyzátory nebo i celulózy (dřevo) (16).

Princip metody rtuťové porozimetrie spočívá v jevu kapilární deprese. Pokud se ponoří pevné těleso do kapaliny o velkém povrchovém napětí (rtuť), dojde k vniknutí kapaliny do pórů látky jen vlivem vnějšího tlaku. Čím jemnější je systém pórů – tím větší je potřeba tlak pro vyplnění těchto pórů. Rovnice (10) vyjadřuje vztah, který stanovil již v roce 1921 Washburn.

$$g\rho h\pi r^2 = -2\pi\gamma\cos\Theta \quad (10)$$

Kde $g\ m/s^2$ je zrychlení, $\rho\ g/m^3$ je hustota rtuti, $h\ m$ je výška sloupce rtuti v póru, $r\ m$ je poloměr póru kruhového průřezu, $\gamma\ N/m$ je povrchové napětí rtuti v póru (tabulka 3 uvádí povrchová napětí některých látek) a θ je úhel smáčení stěn pórů rtutí.

Tabulka 3: Přehled povrchových napětí σ některých látek.

Povrchová napětí vybraných látek	
Látka	Povrchové napětí $\sigma\ 10^{-3}\ N\ m^{-1}$ při 20 °C
Aceton	23,3
Benzen	28,9
Etanol	22,55
Rtuť	476
Voda	72.75

Při tlakovém testu se tedy nejprve vyplňují póry o největších poloměrech r a postupným zvyšováním tlaku dochází k vyplňování i jemnějších pórů. Základním předpokladem stanovení distribuce velikostí pórů je, že zkoumaný materiál nesmí s pracovním médiem (rtutí) reagovat, předpokládá se, že vlivem tlaku rtuti dojde jen k nepatrným deformacím porózní struktury a že parametry rtuti (povrchové napětí a smáčecí úhel) jsou na tlaku působícím tlaku nezávislé.

1.2.3 Metoda heliové porósimetrie

Metoda heliové porósimetrie dle (17) užívá principu plynové expanze tak, jak ho popisuje stavová rovnice ideálního plynu (18). Stavová rovnice ideálního plynu vyjadřuje jeho stav na základě stavových veličin a to: termodynamické teploty T , tlaku p , objemu V a počtem molekul n . Rovnice (11) ukazuje stavovou rovnici ideálního plynu.

$$p * V = \frac{m}{M_m} * R * T \quad (11)$$

Kde p je tlak plynu Pa , V je objem plynu m^3 , m je hmotnost plynu kg , M_m je hmotnost molekuly kg , podíl $\frac{m}{M_m}$ je vlastně počet molekul (1), R je molární plynová konstanta = $8,31 J K^{-1} mol^{-1}$, T je termodynamická teplota K .

Stavovou rovnici ideálního plynu je možné napsat pro různé stavy téhož plynu rovnici (12).

$$\frac{p_1 * V_1}{T_1} = \frac{p_2 * V_2}{T_2} = \frac{p * V}{T} = konst. \quad (12)$$

Kde p_1 je počáteční absolutní tlak Pa , V_1 je počáteční objem m^3 , T_1 je počáteční absolutní teplota K , p_2 je expandovaný absolutní tlak Pa , V_2 je expandovaný objem m^3 , T_2 je koncová absolutní teplota K .

Heliová porózimetrie stanovuje dle (17) porózitu vzorku metodou vniknutí helia do vzorku. Při vlastním testu se sledují změny objemu zkušebního plynu (helium) v závislosti na izotermické expanzi do neznámého prázdného prostoru (dutiny ve zkoumaném vzorku).

Heliový porozimetr je přístroj měřící objem. Může být použit ke stanovení objemu zrna (pevné fáze) – V_G a objemu pórů – V_P .

Jako intrudující plyn se používá helium z důvodů malého rozměru molekul helia (umožňuje vniknutí plynu i do nepatrných kapilár), adsorpce molekul helia k povrchu zkoumaného vzorku je malá (dochází jen k vyplnění dutin) a molekuly mají malou atomovou hmotnost (mají velkou difuzivitu – rychle se rozředí na nižší koncentrace a rychleji proniká i zdánlivě kompaktními materiály).

1.3 Počítačové modelování transportních jevů porózním prostředím

1.3.1 Transportní jevy

V této pasáži je popsáno, co jsou transportní jevy a jaké mechanismy způsobují jejich aktivaci.

V nevyvážených soustavách se uskutečňují tzv. ireverzibilní (nevratné) pochody, jejichž cílem je vyrovnaní rozdílných stavů, jak se uvádí např. v (19). Tyto rozdílné stavy je možno popsat.

- Teplotní rozdíly se vyrovnávají tokem tepla (proudění, vedení a sálání).
- Rychlostní rozdíly při proudění tekutiny se projeví tzv. vnitřním třením – viskozitou (tento odpor vzniká např. při pohybu tekutiny přes různé průtočné průměry – jako jsou ventily, zúžená a zakřivená místa; proto při proudění tekutiny vznikají ztráty a zavádí se tzv. bezrozměrná veličina ztráty – λ).
- Transportní jevy, které vznikají vlivem difuze (samovolné vyrovnávání koncentrací).

Pojmem *tekutina* se rozumí plyny, páry i kapaliny, které se vzájemně liší *mezimolekulárními silami* a protože mezimolekulární síla je úměrná vzdálenosti – *mezimolekulárními vzdálenostmi*. Plyny obecně vykazují velké vzdálenosti molekul oproti kapalinám a nevytváří hladinu.

Při řešení transportních jevů se užívá dvou přístupů – *kontinuálního* (použitý např. v software Comsol a Fluent) a *diskrétního* přístupu (metoda Monte-Carlo).

V dnešní době existuje mnoho software k řešení a modelování transportních jevů a některé z nich řeší proudění v porózních prostředích. Tyto simulační software pracují s metodou konečných prvků (FEM) (20) a nalezení konečného řešení spočívá v numerickém vyřešení parciálních diferenciálních rovnic (PDE). Software, kterým je možno řešit různé úlohy z oblastí jako: *akustika, simulace z oblasti přenosu elektrického proudu, biotechnologie, simulace transportních jevů v zemské kůře, atd.*, nabízí např. firma COMSOL (21).

1.3.2 COMSOL

Softwarový balík COMSOL MULTIPHYSICS (22) usnadňuje všechny kroky nutné k modelaci reálných dějů. Dle (22) je možno si nadefinovat geometrii, specifikovat fyzikální podstatu simulace, vyřešit a stanovit hodnoty výsledků simulace. Nastavení modelové situace je rychlé díky předdefinovaným modelovým rozhraním, která jsou součástí knihoven. Lze snadno modelovat situace proudění tekutin, přenosy tepla i analýzy elektromagnetických dějů. Vlastnosti materiálů a počáteční a okrajové podmínky mohou být libovolné funkce závislých proměnných. Předdefinované šablony lze použít k řešení mnohých běžných typů situací. Program umožňuje také použít vlastní parciální diferenciální rovnice a použít je pro řešení daného fyzikálního problému.

Jako většina softwarových balíků, obsahuje i COMSOL MULTIPHYSICS přídatné balíky k řešení speciálních uživatelských problémů. Zde je možno zmínit balík EARTH SCIENCE MODULE (23).

Earth science module (ESM)

Modul ESM (23) umožňuje snadno modelovat proces jednoduchého nebo spojeného podpovrchového toku. Modul je vhodný také ke studiu toků olejů a plynů skrz porózní média, modelaci toku vody po povrchu země a šíření kontaminující látky půdou. V tomto modulu je dostupná široká škála speciálních rozhraní, kde se uplatní např. *Richardsovy a Navier-Stokesovy rovnice, Darcyho zákon a Brinkmanovo rozšíření Darcyho zákona*. V tomto modulu je možno navíc simulovat transport roztoků a tepla přes porózní médium.

- **Příklady použití *earth science module*:**

- analýza pobřežních dějů – tečení, přenos tepla prouděním a difuze;
- simulace uskladnění plynů, sanační a oddělovací simulace;
- magneticko-hydrodynamické toky magmatu;
- mechanické a gravitační odvodňování porózních a vláknitých materiálů;
- analýza získávání ropy;
- analýza šíření znečištění pod povrchem, na povrchu a ve vzduchu;

- analýza poroelastických dějů, analýza sesedání terénu, analýza tlaků a zlomů v zemské kůře;
- nasycený a nenasycený porózní tok;
- tok a usazování sedimentů v povrchových vodách;
- modelace jednofázového, vícefázového (kapalina a plyn) toku porózním prostředím;
- analýza výšky hladiny vody a zasolení podzemní vody;
- analýza vrtů;

Za velký nedostatek software Comsol mulipysics lze považovat nemožnost načíst reálnou strukturu. Vždy se pracuje jen s geometrickým modelem, který se za účelem simulace vytvoří.

1.3.3 ANSYS FLUENT

Dalším simulační software, který umožňuje modelovat proudění v různých systémech a i přes porózní materiály je program Fluent (24) společnosti ANSYS. Tento software představuje komplexní produkt pro modelování proudění tekutiny a jiné související fyzikální jevy pomocí stacionárních a nestacionárních Navier-Stokesových rovnic. Nabízí možnosti analýzy neparalelních toků (tok všemi směry) tekutin, vnitřní a vnější obtékání těles, lze řešit laminární i turbulentní podmínky proudění. Ansys používá k výpočtům metodu CFD (computational fluid dynamics). Jedná se vlastně o nalezení řešení pomocí metody konečných objemů.

Ansys fluent obsahuje široké možnosti modelování, které jsou potřeba k simulaci toků, turbulencí, přenosu tepla a jevů, které se vyskytují v průmyslových aplikacích, apod. Lze simulovat např. proudění kolem křídla letadla, spalování plynů v generátorech, tok lidské krve krevním řečištěm, atd.

Možnosti použití:

- modelování turbulentních jevů;
- míchání směsí;
- modelování přenosu tepla;
- proudění porózními materiály – filtry;
- dynamika chemických reakcí;

- modelování problémů z akustiky;
- modelování vícefázových proudění.

Za velký nedostatek software Ansys fluent obdobně jako u Comsol multiphysics lze považovat nemožnost načtení reálné struktury. Všechny výpočtové software obsahují modelační prostředí, kde se definuje problém k řešení. Ovšem možnost načtení nasnímané reálné struktury chybí.

1.3.4 Software pro tvorbu reálných textilních struktur (tkaniny)

Pro pravidelné textilní struktury, kde se opakuje nějaká vazba (tkaniny a pleteniny), existuje řada modelační programů. Software pro textilní vizualizaci obvykle užívají ideální modely založené na zjednodušených strukturních předpokladech, které nemusí být v souladu s realitou. Reálný model se obvykle rekonstruuje z 2D paralelních řezů. Čím více je těchto 2D řezů, tím lepší je výsledek rekonstruované struktury.

V práci (25) se autoři zaměřili na ověření souladu mezi realitou a modelem, který navrhli pro modelování reálné tkaniny. V oblasti modelování textilií se podobné tendence objevily již cca před 30 lety. Bylo lákavé tvořit modely reálných pravidelně se opakujících textilních struktur. Všichni, kteří se touto modelací zabývali, chtěli analyzovat různé děje, které se v textiliích mohou vyskytnout. Ať už se jedná o mechanické namáhání délkových textilií při tkaní či pletení, vliv různých dostav na parametry tkanin, velikost ok v tkaninách, vliv různých zakrytí na prodyšnost textilií, mechanické vlastnosti tkanin a pletenin při změně parametrů apod. Zprvu tyto modelační software zpravidla neobsahovaly žádný grafický, vizualizační výstup. Software, který umožnil jednak výpočet a zároveň i vizualizaci struktury byl program ViseTex (26).

Častou nevýhodou těchto software je, že předpokládají relativně ideální strukturu tkanin či pletenin. Textilní materiál, na rozdíl od kovových produktů, potřebuje trochu jiný pohled. Např. u tkaniny se skládá ze soustavy dvou kolmých délkových textilií – osnovy a útku. Jejich vzájemné zpevnění je dáno provázáním – tedy vazbou. Ať už se jedná o plátňovou, keprovou či atlasovou vazbu. Zde je analogie s pleteninami, které mají rovněž své charakteristické vazby dle toho, jestli se jedná o zátažnou či osnovní pleteninu. Při procesu výroby plošných textilií dochází ke změnám např. délkových textilií vlivem sil, které strukturu tvoří – délkové textilie se deformují pod vaznými silami, apod. Při modelu vazby

se vychází z předpokladu, že použitá vazba i vazné délkové textilie se nedeformují. Popřípadě se uvažuje průřez délkových použitých textilií jako elipsovitý. Obvykle je vymodelovaná struktura zjednodušením reálné. Tato zjednodušení se musí posoudit z hlediska vlivu na reálnou strukturu. Tyto modely se nazývají *ideální modely*. Získání reálné struktury je podmíněno tvorbou rovinných řezů zkoumaných materiálů. V práci (25) bylo dokázáno, že *reálný model* tkaniny se od ideálního modelu tkaniny příliš neliší. Tedy že apriorní informace, které máme o vazbě, i o vazných délkových textiliích nám stačí k tvorbě modelu, který celkem přesně popisuje reálnou strukturu tkaniny.

Pro složité a náhodně orientované struktury je tvorba popisujícího modelu téměř nemožná. Jediná cesta spočívá v tvorbě řezů a jejich digitalizaci. Proto byla dále v práci zkoumaná struktura analyzována řezem a následně obrazovou analýzou.

Intermezzo

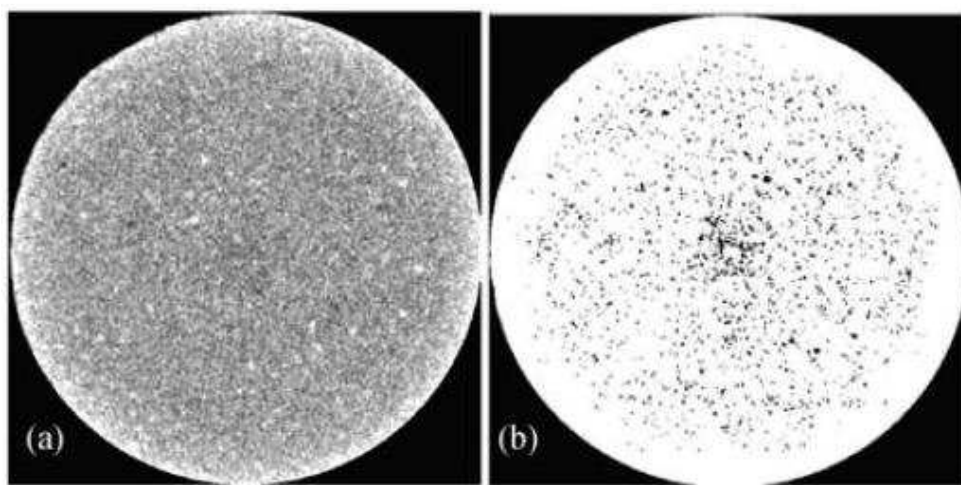
V současnosti existuje mnoho způsobů stanovení porózy u různých materiálů, ať už se jedná o různé textilie, stavební materiály, chemické katalyzátory apod. V první části práce bylo mimo jiné pojednáno o tom, jak se nepřímo stanovuje poróza tzv. nepřímými metodami jako: bublinkovou metodou, rtuťovou porozimetrií, stanovení porózy na základě propustnosti kapaliny nebo plynu. Bylo pojednáno také o moderním, populárním a rychlém způsobu zkoumání porózy ve vytvořených modelech pomocí speciálního software, které mají napodobovat realitu. Všechny jmenované metody mají výhodu ve snadném provedení pokusu, kterým je možné porózu stanovit, modelovat, apod. Nevýhodou těchto metod stanovení porózy spočívá v neznalosti skutečné struktury – obvykle se nezjistí tvar pórů, jejich umístění, při modelaci v software dochází k nahrazování skutečných struktur modelovými strukturami. Pro zjištění skutečného uspořádání existuje nástroj – obrazová analýza. Tento nástroj je použit k vizualizaci např. řezů skutečných struktur. Aby bylo možné stanovit skutečné uspořádání v porózních médiích, je nutné zkoumat porózu přímo – právě na základě obrazové analýzy. Pro zkoumání textilií není obrazová analýza ničím novým a s užitekem se již dlouho používá. Práce se tedy v dalších kapitolách bude věnovat právě možnostem obrazové analýzy k stanovení např. vnitřní struktury u textilních útvarů.

1.4 Charakteristiky porózní struktury získané metodou obrazové analýzy

Uplatnění obrazové analýzy k získání požadovaných informací o porózitě a rozmístění pórů jsou uvedeny např. v publikaci (27). V této práci byl analyzován červený čínský pískovec. Ovšem popsanou metodu lze použít i pro jiné materiály např. textilní materiály. Postup kroků vedoucích k analýze pórovitosti by se dal shrnout do následujících kroků tak, jak bylo postupováno i v práci (27).

1.4.1 Příprava řezů zkoumané struktury

Pro vlastní vyhodnocení struktury čínského červeného pískovce byly provedeny řezy na zkušebním válečku ze zkoumané horniny. Každý řez byl proveden v určité rozteči od řezu předchozího. Byly získány CT obrázky (CT – počítačová tomografie) o rozlišení 512×512 pixel. Stupně šedi měly rozsah 0–255 (0 černá barva a 255 bílá barva). Obrázek 17 ukazuje získaný CT obraz červeného čínského pískovce ve stupních šedi a jeho převod do černé a bílé.



Obrázek 17: Snímek pískovce: (a) – skutečný obraz řezu, (b) – převedený obraz do černé a bílé dle (33).

1.4.2 Získání prahu T, kterým se binarizuje šedý obrázek

Pro vlastní převod obrázku ze stupně šedi (získaný CT metodou) do černobílého obrázku (binární obraz) bylo nutné nastavení správné hodnoty prahu T. Prahem T se rozumí mez,

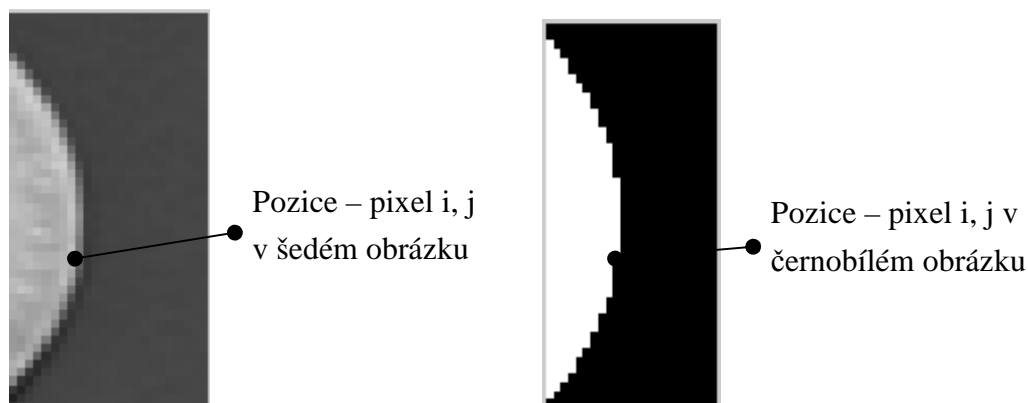
od které je obrazová informace brána již jako černá a nikoli bílá. Výsledkem je pak černobílý obrázek získaný z šedého CT obrázku.

Vlastní zápis prahování T uvádí vztah (13).

$$g_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } f_{i,j} \geq T \\ 0 & \text{if } f_{i,j} < T \end{cases} \quad (13)$$

Kde T je práh, který když hodnota obrazové informace $f_{i,j}$ převýší, pak je této hodnotě přidělena hodnota 1 (černá) a analogicky, když ji obrazová informace nepřevýší, pak je označena hodnotou 0 (bílá). Hodnota prahu T se dá najít empiricky, nebo také existují metody automatické – např. metoda Japonce Nobuyuki Otsu – hledání prahu z šedého obrázku tak, aby vzdálenost středních hodnot popředí (např. vlákna) a pozadí, byla maximální.

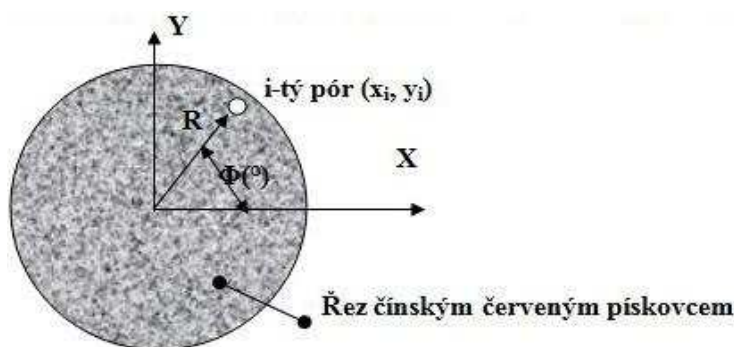
Zde je potřeba zmínit, že klíčovým faktorem, který ovlivní přesnost takto převedeného obrazu do černobílého obrazu, je správně zvolený práh T. Špatně zvolený práh T pak popisuje převedený obraz nepřesně. Obrázek 19 ukazuje převod šedého obrázku do černobílého obrázku (jedná se o ilustrační převod obrázku hrany mince).



Obrázek 19: Souřadnice – pixel i, j v šedém obrázku a souřadnice téhož pixel v černobílém obrázku.

1.4.3 Práce se získaným obrazem, kalibrace a vyhodnocení

Získané výsledky zkoumané struktury je pak možno načíst do vhodného software např. MatLab (28) a provést např. statistické vyhodnocení získané struktury, určení těžišť nalezených objektů, nalezení souřadnic těžišť, apod. Charakteristiky, které se zjišťují, plně odpovídají účelu, pro který se daný vzorek zkoumá. V případě, kdy je nutné zjistit např. konkrétní rozměry analyzovaných struktur, je potřeba provést tzv. kalibraci obrazového rozměru. Jak již bylo řečeno výše, obraz se skládá z pixel. Kalibraci je možno chápat např. takto: $1 \text{ pixel} = 1 \mu\text{m}$. Hodnotu kalibrace je možné získat např. pomocí tzv. kalibračních mír pro mikroskopy (zpravidla však již všechny mikroskopy určené k obrazové analýze mají kalibraci pro velikost pixel nastavenou). V práci (27) např. byla hodnocena pozice jednotlivých pórů ve struktuře – tj. na jakém poloměru od středu souřadného systému se konkrétní póry nacházejí a jaké je jejich natočení vůči zvolenému souřadnému systému. Obrázek 18 ukazuje, jak byly analyzovány póry červeného čínského pískovce v publikaci (27).



Obrázek 18: Geometrická definice centrální souřadnice konkrétního póru (x_i, y_i), vzdálenost od středu souřadného systému $R \text{ mm}$, úhel pozice póru s osou x $\varphi (^{\circ})$.

1.5 Digitální reprezentace obrazu

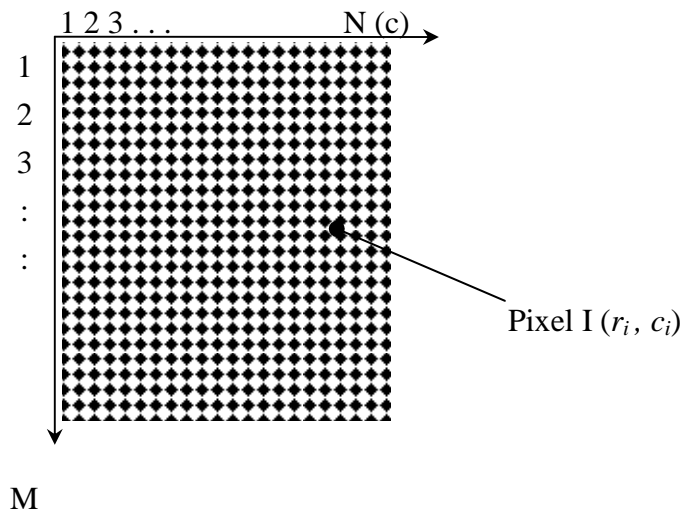
Jak již bylo uvedeno výše, většinou není dostatečné pouhé oční prozkoumání získaného obrázku, ale je nutné výsledek dále zpracovávat, použít v jiném software, apod. Proto je zde uvedena teorie ze zpracování obrazu. Níže je uveden postup, jak je obraz uložen v počítači a připraven pro provádění požadovaných operací, popřípadě použití získaných dat k dalším výpočtům – např. modelování a simulace transportních jevů, aj.

Digitální obraz dle (29) může být definován jako funkce dvou proměnných $f(x, y)$, kde x a y představují prostorové souřadnice a funkční hodnota funkce f na každé souřadnici $(x,$

y) se nazývá intenzita obrazu v konkrétním bodě (x, y) . Termín *stupeň šedi* se často používá k vyjádření intenzity monochromatických obrazů (*monochromatický – mající jen jednu barvu*). Obraz, který se bude digitalizovat, by měl být spojitý v souřadnicích x, y a měl by být spojitý také v *amplitudě* (výchylce). Převod takového obrazu do digitální reprezentace vyžaduje, aby byly digitalizovány jednak souřadnice, ale i amplituda. Digitalizace souřadnic se nazývá *samplování* a digitalizace amplitud se nazývá *kvantifikace*. Pokud tedy hodnoty souřadnic x, y a *amplitudy* funkce f jsou konečné (diskrétní veličiny), pak se takovýto obraz nazývá digitální obraz.

1.5.1 Počítačové uložení obrazu

Výsledkem digitalizace souřadnic (samplování) a výpočet funkční hodnoty (kvantifikace) je matice reálných čísel. Předpoklad je, že obraz $f(x, y)$ je *digitalizován* tak, že má M řádků a N sloupků. Zjednodušeně se dá říci, že je rozměru $M \times N$. Řádek se obvykle značí písmenem r (row – řádek) a sloupek se značí písmenem c (column – sloupek). Zavádí se označení $f(r, c)$. Obrázek 20 ukazuje souřadnicový systém – dohodu v souřadnicovém systému dle (29). Obvykle se také značí první bod obrazu (pixel) indexem $(r, c) = (1, 1)$. R sahá od 1 do M , a c sahá od 1 do N .



Obrázek 20: Dohoda v souřadnicovém systému.

Výsledkem je pak uložení obrazové funkce $f(x, y)$ – viz. níže uvedený maticový zápis.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) \dots & f(1,N) \\ f(2,1) & f(2,2) \dots & f(2,N) \\ f(M,1) & f(M,2) \dots & f(M,N) \end{bmatrix}$$

Pravá strana rovnice popisuje každý prvek digitálního obrazu. Každý prvek tohoto pole se nazývá obrazový *element (pixel)*. A je vyjádřen svojí pozicí a svojí intenzitou.

1.5.2 Vyhodnocování vlastností a charakteristik v digitálním obraze

Jak již bylo uvedeno výše, je potřeba stanovit různé charakteristiky, které se v obraze zkoumají. Zpravidla vyhodnocovací software pro obrazovou analýzu je mají implementovány v sobě, takže jejich použití není obtížné. Pokud je uživatel zručnější, existuje tu možnost nalezení požadovaných charakteristik v obraze jiným způsobem. Zde je možno uvést opět software MatLab.

K vyhodnocení charakteristik v digitálním obraze jako např.: *obvod, obsah, těžiště, apod.* zkoumané struktury byl zpracován návod pro software MatLab. V MatLab je k tomuto účelu dostupný IPT (image processing toolbox).

Popis funkcí v *image processing toolbox*, které je možné využít pro obrazovou analýzu. Funkce na zjištění vlastností oblastí se jmenuje *regionprops*, *L* je matice, která představuje např. sejmutý digitální obraz. *A* je matice, kam se zjištěná hodnota uloží, *properties* představuje vlastnost, kterou chceme zjistit.

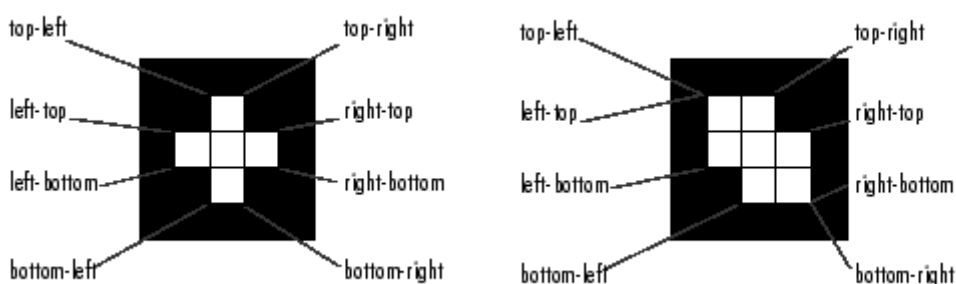
Zápis vypadá takto:

`A= regionprops(L, properties)`

Zjistitelné charakteristiky v software MatLab

- *Area* – je to funkce k zjištění počtu pixelů ve zkoumaném regionu (oblasti).
- *Bounding Box* – je to funkce k zjištění souřadnic nejmenšího obdélníku, který zkoumaný region obsáhne.

- *Centroid* – je to funkce k zjištění těžiště zkoumaného regionu.
- *ConvexHull* – je to funkce k zjištění souřadnic nejmenšího polygonu, který zkoumanou oblast obsáhne.
- *ConvexImage* – zjišťuje velikost obrazu, jenž překryje zkoumanou oblast.
- *ConvexArea* – stanovuje počet pixelů v polygonu, který zjistí funkce *ConvexImage*.
- *Eccentricity* – stanovuje excentricitu (vzdálenost) pixelu vzhledem k těžišti ve zkoumané oblasti.
- *EquivDiameter* – je to průměr stejnoplochého kruhu jako má zkoumaná oblast.
- *EulerNumber* – stanovuje počet objektů ve zkoumaném regionu minus počet děr v těchto objektech.
- *Extent* – udává poměr mezi skutečnou plochou zkoumané oblasti a plochou nejmenšího obdélníku, který zkoumanou plochu překryje.
- *Extrema* – tato funkce udává souřadnice krajních bodů vzhledem k poloze ve zkoumané ploše. Obrázek 21 ukazuje interpretace krajních bodů odlišných regionů. Vpravo je krajní bod současně top-left i left-top (horní-levý i levý-horní).



Obrázek 21: Interpretace krajních bodů odlišných regionů dle (34).

- *FilledArea* – funkce pro zjištění počtu pixelů ve vyplněném zkoumané oblasti.
- *FilledImage* – funkce, která vyplní díry ve zkoumané oblasti. Obrázek 22 ukazuje nevyplněné a vyplněné mezery uvnitř objektu.



Obrázek 22: Vyplnění mezer uvnitř objektu dle (34).

- *MajorAxisLength* – funkce na zjištění délky hlavní poloosy elipsy, která opíše zkoumanou oblast.
- *MinorAxisLength* – funkce na zjištění délky vedlejší poloosy elipsy, která opíše zkoumanou oblast.
- *Orientation* – určení úhlu natočení opsané elipsy pro zkoumanou oblast. Obrázek 23 ukazuje natočení hlavní poloosy, která opíše zkoumanou oblast.



Obrázek 23: Natočení, hlavní a vedlejší poloosa elipsy, která opíše zkoumanou oblast.

- *Perimeter* – funkce na zjištění obvodu zkoumané oblasti.
- *PixelIdxList* – zjistí indexy pixelů ve zkoumané oblasti.
- *PixelList* – vypíše souřadnice pixelů zkoumané oblasti.

- *Solidity* – funkce k výpočtu zaplnění zkoumané oblasti dána podílem $Area/ConvexArea$.

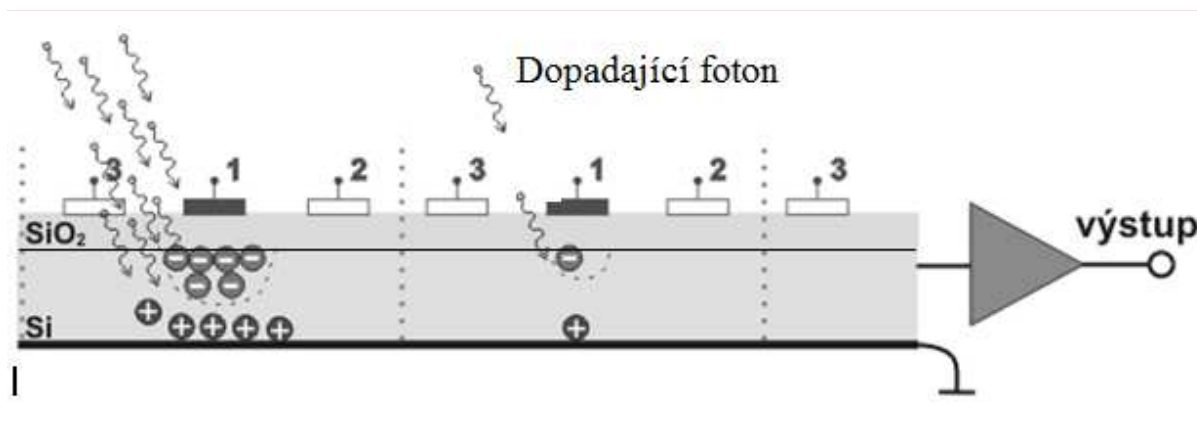
1.5.3 Princip snímání digitálního obrazu

V kapitole 1.5.1 byl mimo jiné popsán způsob, jak je obraz uložen v počítači. Proto není od věci uvést také způsob, jak se obraz získá k uložení do počítače. Zkoumání porózní struktury pomocí obrazové analýzy vyžaduje pořízení snímků zkoumané struktury do digitální podoby. K tomuto účelu se používá technologie CCD. Princip digitálních fotoaparátů je odvozen od klasických fotoaparátů. Fotoaparát je vybaven *systemem čoček* v objektivu, přes které dopadá světlo na *světlocitlivou plochu* digitálního snímače technologie CCD (coupled charge device), nebo CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor).

Světlo přichází přes *system čoček* a je *promítáno na destičku CCD*, kde dochází vlivem nerovnoměrného osvětlení k *vybuzení elektronů*. Následně se pak provede uzavření uzávěrky (clony) fotoaparátu a dojde k sejmutí nerovnoměrně nahromaděných elektronů z destičky CCD.

1.5.3.1 Popis technologie CCD

Technologie CCD, zpracováno dle (30), byla *objevena* již v roce 1969 v Bellových laboratořích pány *Williardem Boylem a Georgem Elwoodem Smithem*. *Původní CCD* prvek fungoval jako určitý typ *paměťového registru*. Pracuje na principu fyzikálního jevu známého jako *fotoefekt*. Světlo, které nás obklopuje, je tvořeno *fotony*. Fotony jsou částice, které mají energii a po nárazu fotonů do atomů dochází k *uvolnění obíhajících elektronů* (tzv. excitaci – vybuzení). Foton při nárazu do atomu odevzdá svoji energii, která způsobí uvolnění obíhajících elektronů. Tento uvolněný elektron je pak možné odvést a zaznamenat, jak silný náraz fotonů byl (podle množství vybuzených elektronů). Obrázek 16 ukazuje princip CCD zařízení.



Obrázek 16: Schéma principu CCD zařízení dle (32).

Elektron má záporný náboj a proto je přitahován ke kladné elektrodě (anodě). Tohoto logického závěru se využije právě při konstrukci CCD prvku. Destička, která tvoří CCD je složena z vrstvy křemíku (Si) a na této vrstvě je nanесena slabá vrstva dokonalého izolantu (SiO_2). Dopadající fotony excitují z vrstvy Si elektrony, které se přitahují s anodami 1, 2 a 3. Ovšem kvůli izolační vrstvě SiO_2 zůstanou na rozhraní (nedochází k jejich okamžitému odvedení). Zbylé kladné náboje se přitáhnou ke katodě.

Z obrázku 19 je patrné, že množství dopadajících fotonů je úměrné vybuzenému počtu elektronů. Nyní dojde k uzavření clony, aby bylo zamezeno dalšímu dopadání fotonů na plošku CCD snímače, a dojde k postupnému zvyšování napětí na elektrodách 2 a snižování napětí na elektrodách 1. Toto postupné pulzování vede k transportu chycených elektronů směrem k výstupnímu zesilovači. Je třeba podotknout, že jsou takto odvedeny všechny vybuzené elektrony a proto dojde k úplnému vyčištění získané informace a další pořízený snímek je autentický a prostý předešlé informace. Zesilovačem je pak zvýšen malý proud z nachytaných elektronů v jednotlivých pixel na napětí, které se dá dále zpracovávat.

Anodové elektrody tvoří jakousi mříž – systém plošek – tedy pixely obrazu. Čím jemnější budou anodové elektrody – tím více jich bude umístěno na ploše CCD destičky a tím vyšší bude rozlišení digitálního obrazu.

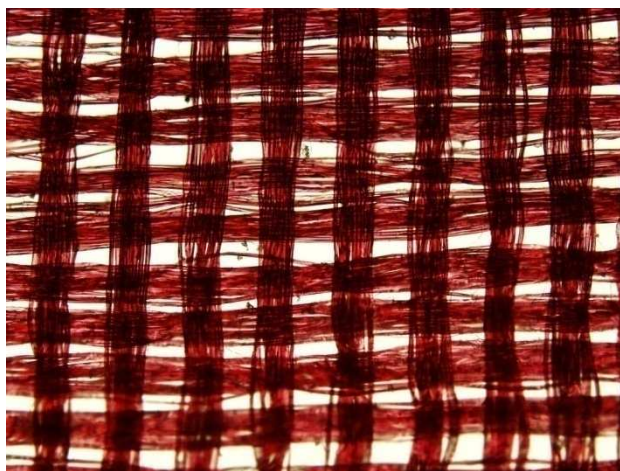
2 PRAKTICKÁ ČÁST

V této kapitole se pojednává o charakteristikách textilních porózních struktur zjistitelných z pohledu na strukturu a charakteristiky zjistitelné z řezu struktury. Je zde popsán způsob tvorby řezu zkoumané textilní struktury, mikroskopické metody vedoucí k zjištění vnitřní struktury a postup, jak zkoumanou strukturu digitalizovat. Pro ověření získaných charakteristik z řezů vzorku je dále provedena analýza charakteristik zkoumaného vzorku také metodou měření prodyšnosti zkoumaného vzorku a metodou vážení vzorku. Závěrem kapitoly je navržen postup, kterým by bylo možno se do budoucna ubírat z hlediska zkoumání a zjištění charakteristik textilních porózních struktur.

2.1 Stanovení zakrytí tkaniny

Cílem tohoto experimentu bylo ověření postupu digitalizace a zpracování získané obrazové informace podobně, jak je např. uvedeno v kapitole 1.4. V tomto experimentu bylo zjišťováno zakrytí tkaniny Z metodou sčítání černých a bílých pixelů obsažených v převedeném obraze. Jiný způsob stanovení zakrytí Z by např. vyžadoval vývoj algoritmu ke stanovení průměrů osnovních a útkových nití a také dostav osnovy a útku.

Na mikroskopu OLYMPUS BX 51 byly pořízeny snímky tkaniny *ponžé* (hustá hedvábnická tkanina v plátnové vazbě). Tkanina byla snímána při zvětšení 125×, rozlišení obrázků bylo 2048×1536 při velikosti pixelu $2 \times 2 \mu\text{m}^2$, rozlišení mikroskopového snímku bylo 12700 DPI (0.2 mm = 100 pixelů), při maximální možné intenzitě procházejícího světla. Maximální intenzita světla byla volena proto, aby byly viditelné i nepatrné průsvity (póry). Obrázek 25 ilustruje nasnímanou tkaninu.



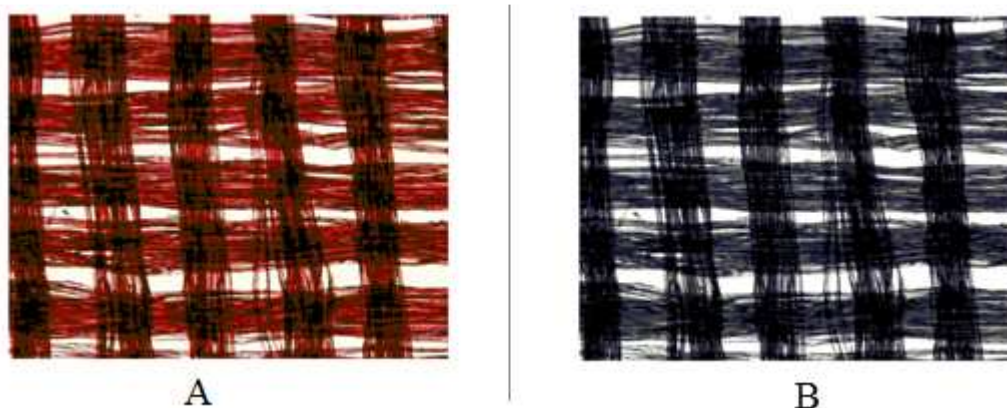
Obrázek 25: Sejmutá tkanina v plátnové vazbě při zvětšení 125×.

Následuje zpracování získaného obrazu pro stanovení zakrytí tkaniny Z

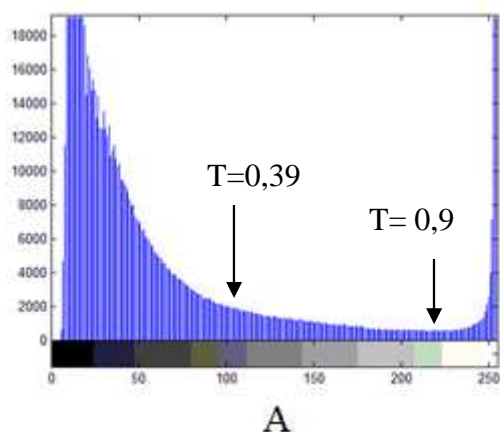
Následně byla obrazová informace zpracována v programu MatLab následujícím algoritmem:

```
A=imread('O.jpg');      % načtení obrázku konkrétní tkaniny
B=rgb2gray(A);          % převedení obrazu tkaniny do stupní šedi
figure, imshow(B)       % zobrazení obrázku převedeného do stupní šedi
C=imhist(B);            % načtení hodnot stupní šedi z histogramu
figure, imhist(B)       % zobrazení histogramu stupní šedi tkaniny
D=im2bw(B,100/255);     % převedení obrazu do černobílého s prahem 0,39
figure, imshow(D)       % zobrazení černobílého obrazu
E=size(D);              % výpočet počtu řádků a sloupků černobílého obrázku
ST=E(1)*E(2);           % výpočet velikosti černobílého obrázku
S=sum(D,1);              % součet všech černých bitů přes všechny řádky
SB=sum(S,2);             % součet všech černých bitů přes všechny sloupky
P=SB/ST                  % stanovení porózy načteného obrázku
Z=1-P                    % stanovení zaplnění načteného obrázku.
```

Výsledkem je původní tkanina – obrázek 26 A. Převedená tkanina do stupně šedi – obrázek 26 B. Histogram četností stupně šedi – obrázek 27 A. Získaná tkanina převedená do binárního obrazu s prahem $T = 0,39$ – obrázek 27 B. Stanovení prahové hodnoty T je možné stanovit také např. na základě Otsu-ova algoritmu, který hledá pozici v histogramu stupně šedi obrázku takovou, kde je vzdálenost středních hodnot popředí (vlákna) a pozadí (oka) maximální.



Obrázek27: Nasnímaná tkanina: A – obrázek v režimu RGB; B – obraz ve stupních šedi.



Obrázek 27 A: Histogram četností stupně šedi převedeného obrázku a volené prahy T .



B

Obrázek 27 B: Binární obraz tkaniny získaný prahem $T = 0,39$.

Stanovení hodnoty prahu T :

Za důležité lze považovat stanovení prahu T , kdy je obrazová informace považována již za černou nebo bílou. V tomto ilustračním příkladu byla hodnota prahu T , volena 0,39.

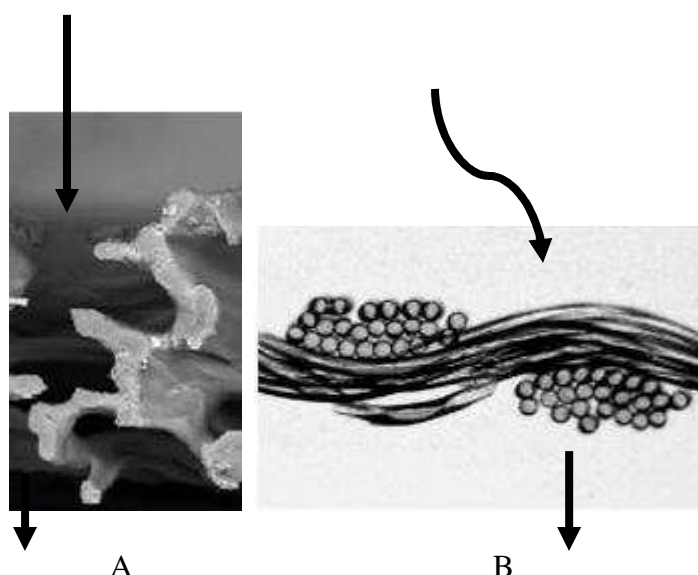
Obyčejně se při převodu obrazu do stupně šedi dostane histogram stupně šedi bimodálního rozdělení (dvouvrcholové). Práh T se pak obyčejně volí zhruba na minimu mezi vrcholy (v tomto příkladě cca $230/255 = 0,9$). Avšak takto zvolený práh vezme jako póry jen skutečně markantně světlá místa – proto byl úmyslně práh volen nižší – právě $T = 0,39$, aby i méně prosvítající místa byla označena jako průchozí.

Výsledkem pokusu bylo, že nasnímaná tkanina vykazovala zakrytí získané z obrazové analýzy při prahu $T = 0,39$ zhruba $Z = 0,77$, tedy nezakrytý povrch $A = 1 - Z = 0,23$.

Protože zakrytí Z není totožné se zaplněním μ (z 2D nelze zjistit poróznost), zkoumají se proto požadované charakteristiky ve 3D – např. pomocí provedených řezů.

2.2 stanovení vnitřní struktury

Jak již bylo ukázáno výše, aby bylo možné určit poróznost textilní struktury, je nutné zkoumat např. řezy. Výběr digitalizované struktury byl proveden s přihlédnutím k požadovanému zadání práce – úkolem bylo nalézt strukturu, která se bude v řezu jevit jako průchozí (má malé zaplnění μ). Tkaniny a pleteniny byly vyřazeny kvůli většímu zaplnění μ oproti netkaným textiliím. U tkanin či pletenin není v drtivé většině řezu viditelný průchozí pór. Obrázek 28 ukazuje, jak vypadá v řezu viditelně průchozí či neprůchozí struktura (šipka označuje směr možného průchodu). Struktura tkaniny na obrázku 28 B je pochopitelně také průchozí, ale není to viditelné kvůli podélně kladené soustavě vláken – tato podélně kladená soustava vláken se jeví jako neprůchozí bariéra.



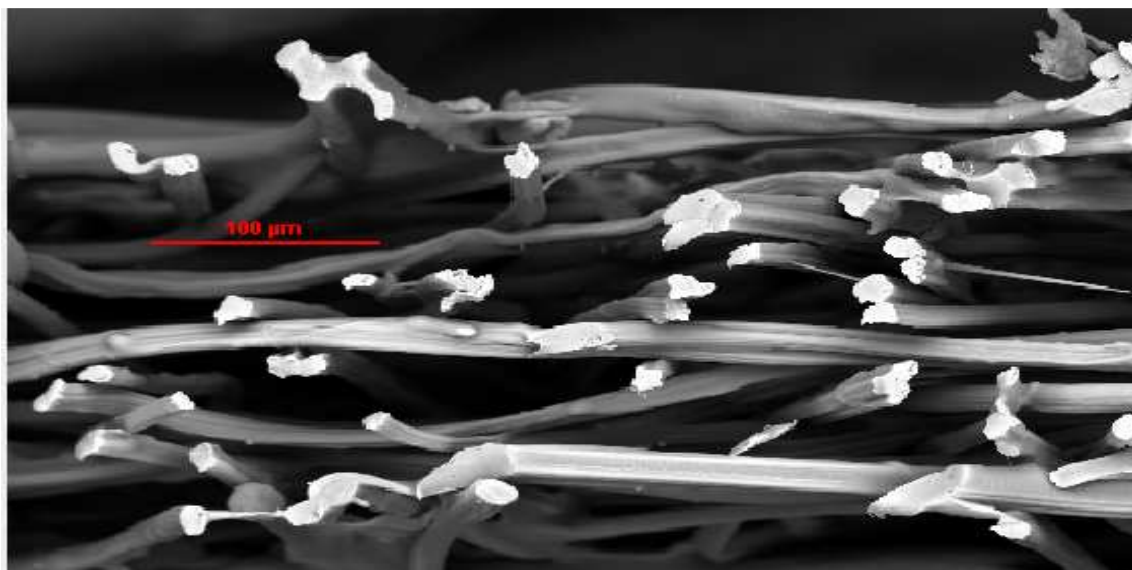
Obrázek 28: Viditelně průchozí struktura – A, viditelně neprůchozí struktura – B.

Z důvodu proveditelnosti řezů běžnými metodami (žiletka, apod.) byly vyřazeny z výběru textilie, kde tvořící vlákna byla jemnější, než činí jemnost bavlny (1,6 *dtex*). Struktury, které byly tvořeny jemnějšími vlákny, nebylo možno běžnými metodami kvalitně řezat. Docházelo k jejich trhání, proto byly z výběru vyřazeny např. nanovláknenné vrstvy, apod. Tyto velice jemné struktury se nedají běžně řezat. Rovněž malé zaplnění mělo negativní vliv na proveditelnost řezů. Proto tedy byly vybrány vzorky netkané textilie (viditelně průchozí struktura) o dostatečné tloušťce vláken (proveditelnost řezů).

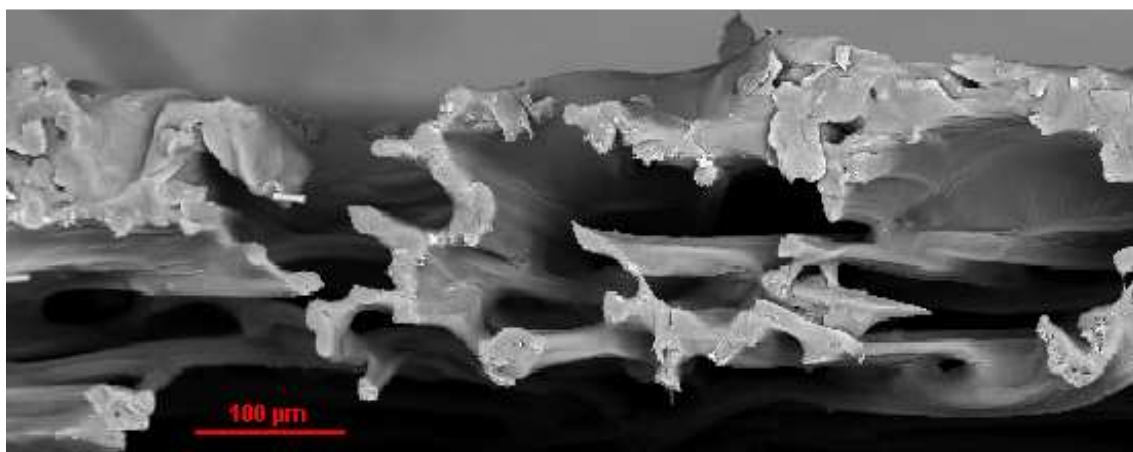
Zkoumané vzorky netkaných textilií byly tyto:

- netkaná textilie vyrobená ze skleněných vláken pojená chemicky
- objemná netkaná textilie vyrobená z PL vláken zpevněná mechanicky vpichováním
- netkaná textilie vyrobená z PL vláken pojená termicky
- netkaná textilie vyrobená z viskóзовých vláken pojená chemicky.

Pro zkoumání vnitřní struktury byly do užšího výběru zahrnuty právě výše uvedené netkané textilie z širokého spektra vyráběných typů. V textilní praxi existují metody sloužící k výrobě řezů textilních struktur. Zpravidla se jedná o zalití zkoumaného vzorku do pryskyřice nebo do disperzního lepidla a po vytvrdnutí následuje navíc zalití vzorku do vosku v případě disperzního lepidla. Z takto vyrobených preparátů se následně odbrušují nebo odřezávají jednotlivé vrstvy, které se pozorují. Ovšem tyto metody jsou vhodné pro textilní struktury, jejichž zaplnění a soudržnost je větší, než je tomu právě u většiny netkaných textilií. S výhodou se takto dají připravovat vzorky řezů přízí, jednotlivých monofilů/multifilů, tkanin nebo pletenin. Při zalití vzorku dochází totiž k efektu splavení (vlákna zkoumané struktury se posunou, dojde k vytvoření nových shluků vláken, které před zalitím ve struktuře nebyly). U soudržných struktur toto zaplavení pojícím materiálem není rozhodujícím ovlivňujícím faktorem, protože soudržná struktura jako např. příze si ponechá svoji vnitřní strukturu uchovanou vlivem třecích sil mezi vlákny. Zalitím dojde např. u příze pouze k ulpívání povrchových odstávajících vláken k povrchu. U netkaných textilií, které mají většinu svého objemu tvořenou prázdným prostorem, dojde ovšem zalitím vzorku ke splavení a ovlivnění zkoumané struktury. Většina vláken po zalití díky své ohybnosti změni svůj směr ve vzorku. Obvykle se vlákna, pokud byla před zalitím ojednocena, přidruží k ostatním vláknům (vlivem povrchových aktivních látek) a vytvoří jakési nové shluky vláken – dojde k vytvoření zcela nové struktury. Výstup z elektronového rastrovacího mikroskopu ukazuje obrázek 29. Pro srovnání je na obrázku 30 uveden i obrázek té samé struktury, ale zalité v nosném skeletu disperzního pojidla. Na porovnání je patrné, že zalitím vzorku dochází ke ztrátě informace o skutečné vnitřní struktuře. Identifikace vlastní struktury je pak velice obtížná.



Obrázek 29: Struktura NT typu PERVIN 40 v elektronovém mikroskopu při zvětšení 300 ×.



Obrázek 30: Zalitá struktura NT PERVIN 40 v elektronovém mikroskopu při zvětšení 200 ×.

Z tohoto zjištění plyne závěr, že metoda zalívání a následné odřezávání vzorků pro materiály podobné netkaným textiliím není univerzálně použitelná.

Byly hledány tedy jiné metody pro stanovení struktury textilie v příčném řezu – byl hledán vzorek, který by umožnil provedení řezu, aniž by musel být zalit v nosném skeletu pryskyřice nebo disperzního pojiva. Provedením řezu bez zalití vzorku ovšem dojde také ke změně vnitřního uspořádání vláken. Zde by se dalo však říci, že výběrem vhodného vzorku a provedením řezu dojde vlivem tvarové paměti vláken k částečnému navrácení vláken do původního uspořádání. Vláknům totiž sama o sobě pruží a po odlehčení se vrací

částečně zpět. Orientačními zkouškami k zjištění proveditelnosti řezů byla stanovena vhodnost či nevhodnost výše vybraných vzorků NT k dalšímu zkoumání. Shrnutí poznatků je uvedeno níže:

- *Netkaná textilie vyrobená ze skleněných vláken* vykazovala při provedení řezu lámání skleněných vláken, proto nebyla použita.
- *Objemná netkaná textilie zpevněná vpichováním* byla vyřazena z výběru kvůli prostorové anizotropii (vlastnosti textilie jsou závislé na směru, ve kterém se stanovují), vlákna jsou totiž ve vpichované textilií převážně ve dvou směrech a to horizontálně a vertikálně – proto by příčný řez v libovolném místě nemusel mít vypovídající hodnotu o struktuře – nebyla dále zkoumána.
- *Termicky pojená netkaná textilie (PETEX)* splňovala požadavky na soudržnost (proto mohla být i zalita do nosného média), ale protože její tloušťka byla cca 0.5 mm a na tuto hodnotu připadala v řezu cca 2-3 vlákna. – viz obrázek 31, nebyla dále analyzována.



- Obrázek 31: Řez textilií PETEX při zvětšení 100 ×.
- Poslední vzorek splňoval podmínky soudržnosti své struktury (nemusel být zalit do nosného média k účelu provedení řezů), ale dosahoval oproti předchozí netkané textilií větší počet vláken v řezu, proto byl vybrán tento vzorek k dalšímu zkoumání. Jednalo se o *netkanou textilii z viskóзовých vláken pojenou chemicky*, dostupnou pod obchodním názvem PERVIN 40.

2.3 Popis parametrů zkoumané NT PERVIN 40

Jak již bylo uvedeno výše, k dalšímu zkoumání vnitřní struktury byl vybrán vzorek NT PERVIN 40 firmy Perla(31). Jednalo se o chemicky pojenou netkanou textilii vyráběnou pod názvem *PERVIN 40*. Základním materiálem byla matovaná (pomocí TiO_2) modře barvená viskózová vlákna o nominální jemnosti 1,6 *dtex* vyráběná německou firmou Lenzing(32). Jemnost 1,6 *dtex* odpovídá bavlnářskému typu vlákna. Sama netkaná textilie *PERVIN 40* má napodobovat právě bavlnu. Její použití je možné jako hygienická prostěradla či pro dekorační použití. Uspořádání vláken ve vybrané netkané textilii je převážně v podélném (strojovém) směru. Vlákenný materiál dle (33) vystupuje ve formě pavučiny z mykacího stroje. Mykací stroj má za úkol vlákna uspořádat, ojednotit a napřímit převážně do směru výstupu z mykacího stroje. Obecně se dá říci, že pro výrobu netkaných textilií se dají používat *bavlnářské (víčkové) či vlnářské (válnové) mykací stroje*. Válnové mykací stroje se používají častěji, protože z hlediska ojednocení a zpracování vláken díky svým větším rozměrům se lépe hodí pro netkané textilie. Pro průmyslové užití se jedná o mykací stroje, které vychází z válcových mykacích strojů, ale jsou upraveny pro konkrétní vlákenný materiál. Jako výhodu si odnáší větší výstupní šíři pavučiny oproti víčkovému mykacímu stroji. Vlastní zpevnění netkané textilie je realizováno vodnou disperzí pojiva, které je nanášeno do vlákenné struktury a jejíž přebytek je na konci technologického procesu odmačknut, textilie je sušena, řezána a nakonec navíjena a expedována. Udávaná plošná hmotnost netkané textilie PERVIN 40 činí dle (31) 40 g/m^2 .

2.4 Zjištění parametrů zkoumané netkané textilie vážením vzorků

Před vlastním zjišťováním vnitřní struktury netkané textilie PERVIN 40 byla nejprve provedena analýza na výpočet zaplnění Z vzorku. Dále byla stanovena tloušťka t zkoumaného materiálu a byla ověřena plošná hmotnost zkoumané netkané textilie.

Z materiálu bylo provedeno 10 řezů o rozměru $10 \times 10 \text{ cm}$. Každý vzorek byl zvážěn na laboratorních vahách, vzorek byl rovněž proměřen na svoji tloušťku. Každá zjištěná hodnota je pak násobena tak, aby získaná hodnota odpovídala normované plošné hmotnosti g/m^2 . Ze zjištěných hodnot byly stanoveny hodnoty zaplnění vzorku μ_v a parametry jako je plošná hmotnost m_s a jiné. Výsledky uvádí tabulka 4.

Tabulka 4: Stanovení charakteristik vzorku z materiálu viskóza o hustotě $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$.

Vzorek	Plošná hmotnost m_s g/m^2	Tloušťka vzorku $t \text{ mm}$	Objem vzorku $V \text{ m}^3$	Hmotnost plného vzorku $m \text{ kg}$	Hodnota zaplnění $\mu_v [l]$
1	41.2	0.27	0.00027	0.405	0.101728
2	41.1	0.27	0.00027	0.405	0.101481
3	39.1	0.26	0.00026	0.39	0.100256
4	40.9	0.27	0.00027	0.405	0.100988
5	40.8	0.26	0.00027	0.405	0.104615
6	41.2	0.27	0.00026	0.39	0.101728
7	41.5	0.27	0.00027	0.405	0.102469
8	41.1	0.26	0.00027	0.39	0.105385
9	40.5	0.27	0.00026	0.405	0.1
10	41.5	0.27	0.00027	0.405	0.102469
Průměrná hodnota	40.89	0.267	0.00027	0.405	0.102112
IS pro střední	41.39 – 40.39	0.27 – 0.264	0.0002746 – 0.00026354	0.406 – 0.395	0.103 – 0.101

Z tabulky plyne, že průměrná tloušťka t netkané textilie PERVIN 40 byla 0.267 mm a průměrná hodnota zaplnění μ byla 0.102 , průměrná plošná hmotnost činila 40.89 g/m^2 , což by odpovídalo parametrům výrobce (40 g/m^2).

2.5 Stanovení prodyšnosti plošné textilie pro vzduch

V tabulce 5 je uvedeno, kolik vybraná zkoumaná netkaná textilie PERVIN 40 dosahovala průměrného zaplnění μ . Pro ověření a zjištění hodnoty zaplnění μ je možno použít způsob

stanovení prodyšnosti za použití Darcyho zákona. Principem stanovení prodyšnosti vzduchu skrz různé materiály (především textilie), slouží metoda stanovení prodyšnosti dle (13). Princip spočívá v upnutí vzorku o daném průměru D m na sací koš, přes vzorek se protahuje vzduch nastaveným tlakovým spádem Δ_P Pa a sleduje se *průtok vzduchu* Q m^3/sec . Tato metoda určuje ochotu vzduchu procházet skrz textilií s co nejmenšími ztrátami. Tuto lineární zákonitost, nazvanou Darcyho zákon (14), popsal již v 19. století francouzský inženýr Henry Darcy. Vztah, který odvodil, ukazuje rovnice (14).

$$Q = \frac{k * A * \Delta_P}{L} \quad (14)$$

Kde k je koeficient propustnosti vrstvy $m^2.Pa^{-1}.s^{-1}$, A je plocha, kterou protéká vzduch m^2 , Δ_P je rozdíl tlaků před vrstvou a za vrstvou Pa a L je tloušťka vrstvy m .

Na základě vztahu (21) se formuluje tzv. *prodyšnost* q $m^3 m^{-2} s^{-1}$, kterou uvádí rovnice (15). Prodyšností rozumíme objem vzduchu Q , který projde plochou A při konstantním rozdílu tlaků Δ_P za jednotku času.

$$q = \frac{Q}{A} \quad (15)$$

Kde Q je průtok vzduchu m^3/s , A je plocha vzorku m^2 .

Z Darcyho rovnice lze získat ještě tzv. *permeabilitu* K $m Pa^{-1} s^{-1}$. Jedná se o prodyšnost q , kde je zahrnut i vliv tlakového spádu Δ_P . Rovnici pro permeabilitu K uvádí rovnice (16).

$$K = \frac{Q}{A * \Delta_P} \quad (16)$$

Kde Q je průtok vzduchu m^3/s , A je plocha vzorku m^2 a Δ_P je rozdíl tlaků před vrstvou a za vrstvou Pa .

Pro úplnost je možno ještě uvést vztahy, které se týkají vrstvených (laminovaných) textilií. Celkový tlakový spád Δ_P pro n vrstev textilie je vyjádřen rovnici (17).

$$\Delta_P = \sum_{i=1}^n \Delta_{Pi} \quad (17)$$

Kde Δ_P je celkový tlakový spád Pa a Δ_{Pi} je tlakový spád Pa na každé vrstvě.

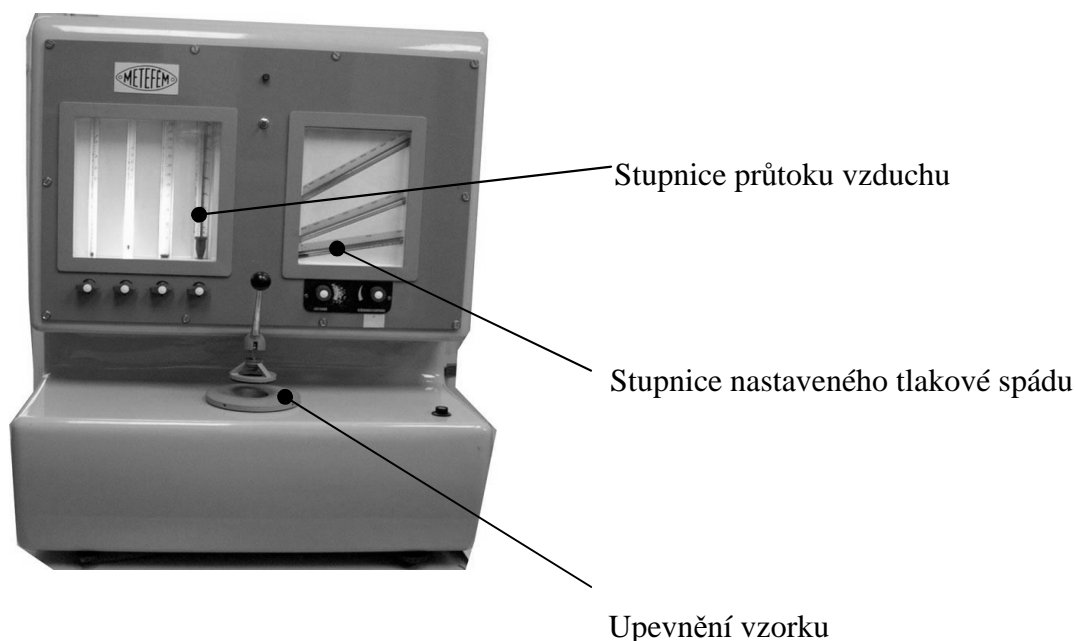
Celková permeabilita K_{total} n vrstev se dá přibližně stanovit podle rovnice (18).

$$\frac{1}{K_{total}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i} \quad (18)$$

Kde K_i je permeabilita konkrétní vrstvy $m Pa^{-1} s^{-1}$.

Pro ověření Darcyho zákona byly navrženy různé přístroje jako např. přístroj METEFEM.

Obrázek 32 ukazuje přístroj METEFEM.



Obrázek 32: Přístroj METEFEM na měření prodyšnosti dle (15).

2.6 Stanovení porózy/zaplnění tkaniny PERVIN 40 přístrojem METEFEM

Přístrojem METEFEM lze stanovit porózu materiálu ψ průtokem tekutiny přes zkušební vzorek. Pokus vychází z rovnice (19). Změří se průtok vzduchu bez vzorku Q_{BV} a průtok vzduchu s upnutým vzorkem Q_V , oba průtoky se realizují vždy při stejném tlakovém spádu Δp Pa . Popřípadě se dají do poměru tlakové spády bez vzorku a se vzorkem $\Delta p_1/\Delta p_2$ při stejném průtoku Q_V .

$$\psi = \frac{Q_V}{Q_{BV}} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} \quad (19)$$

Kde Q_V je průtok vzduchu bez vzorku v m^3/min , Q_B je průtok vzduchu přes zkoumaný vzorek v m^3/min . Δp_1 je tlakový spád bez vzorku a Δp_2 Pa je tlakový spád se vzorkem. Výsledky zjištěné v pokusu na přístroji METEFEM ukazuje tabulka 5. Z důvodu vytvoření požadovaného tlakového spádu při absenci vzorku musela být na přístroji METEFEM provedena malá změna zmenšením průměru sacího koše, aby bylo možno vyvodit měřitelný tlakový spád Δp_1 .

Tabulka 5: Zjištěné hodnoty porózy netkané textilie PERVIN 40 přístrojem METEFEM.

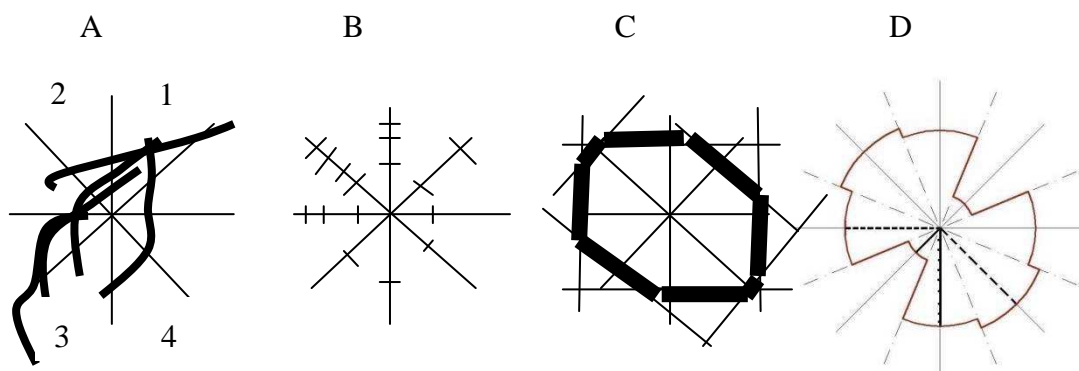
Porózita ψ netkané textilie PERVIN 40 zjištěné na přístroji METEFEM				
Měření	$Q \text{ m}^3/min$	$\Delta p_1 \text{ Pa}$	$\Delta p_2 \text{ Pa}$	$\psi \text{ (1)}$
1	3	389	432	0.90
2	3	403	432	0.93
3	3	393	431	0.91
4	3	387	429	0.90
5	3	400	418	0.96
6	3	377	431	0.87
7	3	392	427	0.92
8	3	386	430	0.90
9	3	368	427	0.86
10	3	372	430	0.87
Průměr	3	386.7	428.7	0.90

Z tabulky plyne, že průměrná porózita netkané textilie PERVIN 40 byla $\psi = 0,90$. Zaplnění μ bylo tedy kolem 0,1. Zjišťováním porózy ψ a zaplnění μ metodou vážení (kapitola 2.4) se došlo k hodnotám porózy ψ kolem 0,898 a zaplnění μ 0,102. Charakteristiky zaplnění a porózy z obou výše jmenovaných postupů (kapitola 2.4, 2.5) celkem korespondují. Obě metody dávají velmi blízký výsledek.

2.7 Popis určení směrové orientace vláken zkoumané netkané textilie PERVIN 40

Vlastně se jedná o stanovení izotropie (zda má vzorek stejné vlastnosti bez ohledu na směr, ve kterém je vlastnost stanovena). Popisem a stanovením směrové orientace rovinných

vlákenných útvarů se zabývá např. (13). Mezi rovinné vlákenné útvary lze zařadit různé druhy pavučin sejmutých z mykacích strojů, navrstvené pavučiny do rouna, různé spleti vláken, projekce silnějších vlákenných útvarů apod. U všech těchto struktur je žádoucí stanovit, do jakého směru se vlákna směřují, jestli mají nějaký systematický trend nebo zda jsou rozmístěna náhodně. Převládající směr (trend) migrace vláken v rovinném vlákenném útvaru lze nalézt vícero metodami. Jednoduchou grafickou metodu, která je však časově náročná uvádí např. (13). Obrázek 33 ukazuje postup stanovení směru migrace vláken. Nejprve se zkonstruuje směrová růžice, která má osy po 45° (A), vlákna, která prochází přes osy, se označí značkou na dotyčných osách (B) a nakonec se provede součet, kolik vláken protnulo konkrétní osu a hodnoty se zakreslí pomocí tzv. Steinerova kompaktu (C). Ze Steinerova kompaktu se pak na základě četností průsečnic vláken se souřadnicemi sestrojí směrová růžice, která vypovídá o směru migrace vláken (D). Na ilustraci se vlákna kumulují směrem ke kvadrantu 2 a 4 směrové růžice, proto i Steinerův kompakt a růžice mají trend směřující ke kvadrantu 2 a 4.



Obrázek 33: Analýza směru migrace vláken a postup tvorby směrové růžice.

Výše uvedený postup je sice poměrně jednoduchý, ale jeho realizace je zdoluhavá a neumožňuje snadné zpracování a vyhodnocení anizotropie pro více vláken. Proto existují další metody, kterými se dá směrníkový trend vláken zjistit. Zajímavý a rychlý způsob je navržen na základě Fourierovy transformace.

2.7.1 Stanovení orientace vláken obrazovou analýzou

Obrazové vyhodnocení směrové orientace je zpracováno dle (34). Nechť existuje obraz ve stupních šedi o souřadnicích $x = 0, 1, 2, \dots, m - 1$, $y = 0, 1, 2, \dots, n - 1$, kde $m \times n$ označuje velikost obrazu. Každý bod popsán souřadnicemi x, y nese informaci o svém jasu – $f(x, y)$. Pak pomocí tzv. dvourozměrné Fourierovy diskretní transformace (2D-DFT) je možno nalézt tzv. globální periodicitu úrovní šedí obrazu tak, že se identifikují vysoké frekvence (vlákna tvořící zkoumanou oblast vlákenného útvaru, která leží v nejvyšší zkoumané rovině, mají i nejvyšší úroveň jasu). Tento předpoklad je splněn např. pořízením obrazu pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu.

Vlastní transformace obrazové funkce $f(x, y)$, kde $x = 0, 1, 2, \dots, m - 1$ a $y = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ na frekvenční funkci $f(u, v)$ se realizuje podle vztahu (20) např. dle (34), kde velikost obrazu je $m \times n$.

$$f(u, v) = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) e^{-i2\pi(\frac{u*x}{m} + \frac{v*y}{n})} \quad (20)$$

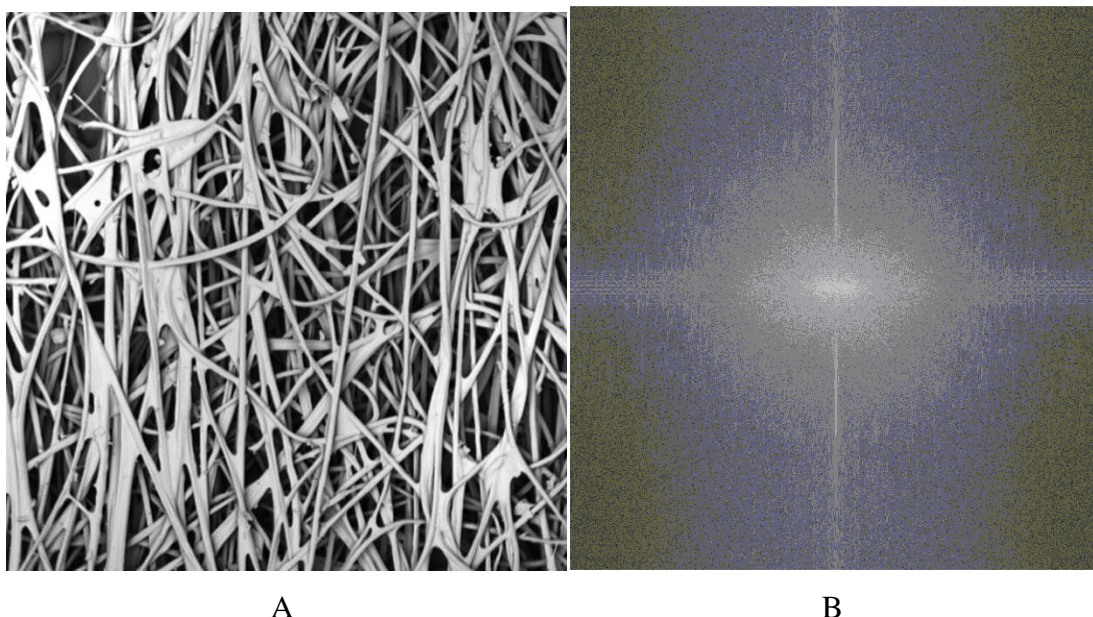
Kde $u = 0, 1, 2, \dots, m - 1$ a $v = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ jsou frekvence. Frekvenční oblast je jednoduchý souřadný systém v rozsahu $f(u, v)$ s frekvenčními proměnnými u a v .

Vlastní stanovení směrové orientace vláken bylo provedeno dle (34) v MatLab:

```
A=imread('A.jpg');           % načtení pořízeného obrázku do proměnné A
                                % je třeba, aby počet řádků byl roven počtu
                                % sloupců - 512x512
B=rgb2gray(A);                % převedení načteného obrázku do stupně šedi.
F = fft2(double(B));           % provedená Fourierova transformace načtené
                                % Obrazové funkce
Fc = fftshift(F);              % provedené centrování Fourierovy transformace.
S2 = log(1 + abs(Fc));          % snížení velkého rozsahu hodnot pomocí
                                % logaritmické transformace
imshow(S2, [ ]);               % zobrazení výsledné Fourierovy transformace.
```

2.7.2 Zjištění směrové orientace na základě obrazové analýzy

Obrázek 34 A ukazuje nasnímanou netkanou textilii PERVIN 40 při zvětšení 168 ×. Na obrázku 34 B je provedená a zobrazená Fourierova transformace jasové informace původního obrázku. Obrázek byl pořízen pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu. Vlákna ve struktuře, která jsou umístěna nejbližší vzhledem ke směru dopadajících elektronů (nejbližší k pozorovateli), se jeví s největší intenzitou světla.



Obrázek34: A: netkaná textilie PERVIN 40, B – Fourierovo spektrum obrazu.

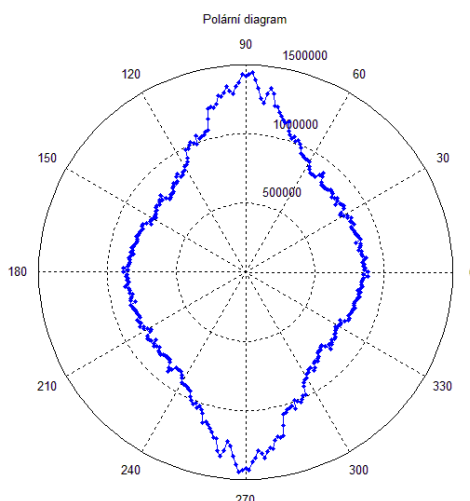
Na pořízeném obrázku 34 A je vidět přichycené disperzní pojivo, které tvoří jakési blány. Vlivem povrchově aktivních látek došlo k ulpívání pojiva do energeticky nepříjemnějšího uspořádání.

Výsledné zobrazení Fourierovy transformace je nutné ještě otočit o 90° po směru hodinových ručiček, aby byl výsledek korespondující se skutečností (zde na obrázku 34 B nutnost otočení o 90° není zjevná, ale u struktury, která vykazuje sklon to patrné je).

Pro snadnější interpretaci zjištěné orientace byla vyvinuta funkce na vykreslení polárního diagramu jasových intenzit dle (35). Obrázek 35 ukazuje zjištěný výsledek Fourierovy transformace. Z polárního diagramu plyne závěr, že vlákna jsou majoritně směřována vertikálním směrem (v ose výstupu z mykacího stroje), což koresponduje s předloženým obrázkem vlákenné struktury.

Pokud se směr vláken sleduje pouze na malém úseku, pak je zjištěný výsledek málo přesný, proto je možno doporučit sledovat strukturu s co nejmenším zvětšením při zachování viditelnosti vláken. V tomto případě bylo nejmenší možné realizovatelné zvětšení $168\times$.

Z tohoto hlediska je Fourierova transformace vhodným detekčním nástrojem pro směrovou orientaci zkoumaných vlákenných útvarů.

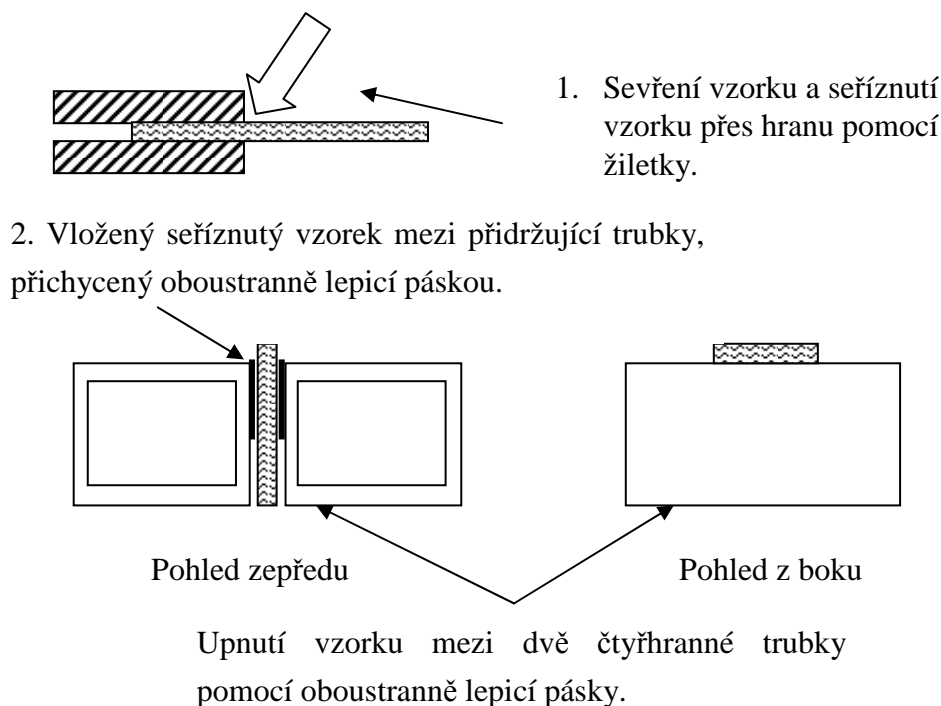


Obrázek 35: Polární diagram zjištěné směrové orientace vláken Fourierovou transformací.

Pro zjednodušení se však použil předpoklad, že níže provedený způsob tvorby řezu kolmo vzhledem k orientaci vláken by se příliš nelišil od řezu provedeného v podélném směru na orientaci vláken.

2.8 Postup tvorby řezu

Aby mohla být zkoumána vnitřní struktura, musel být proveden řez zkoumané textilie. Vzorek netkané textilie PERVIN 40 byl umístěn mezi dvě desky, kde byl následně přes hranu seříznut žiletkou, kolmo na orientaci vláken (orientace vláken vzorku je stanovena v kapitole). Poté byl vzorek opatrně vyjmut a upnut oboustranně lepicí páskou mezi dvě čtyřhranné trubky provedeným řezem směrem nahoru k objektivu mikroskopu. Snahou bylo zajistit horizontální vodorovnost a vertikální kolmost řezu k základně. Obrázek 36 ukazuje postup tvorby řezu.



Obrázek 36: Postup přípravy upnutí vzorku pro pozorování v dopadajícím světle.

2.9 Druhy metod k vyhodnocení vnitřní struktury vzorku

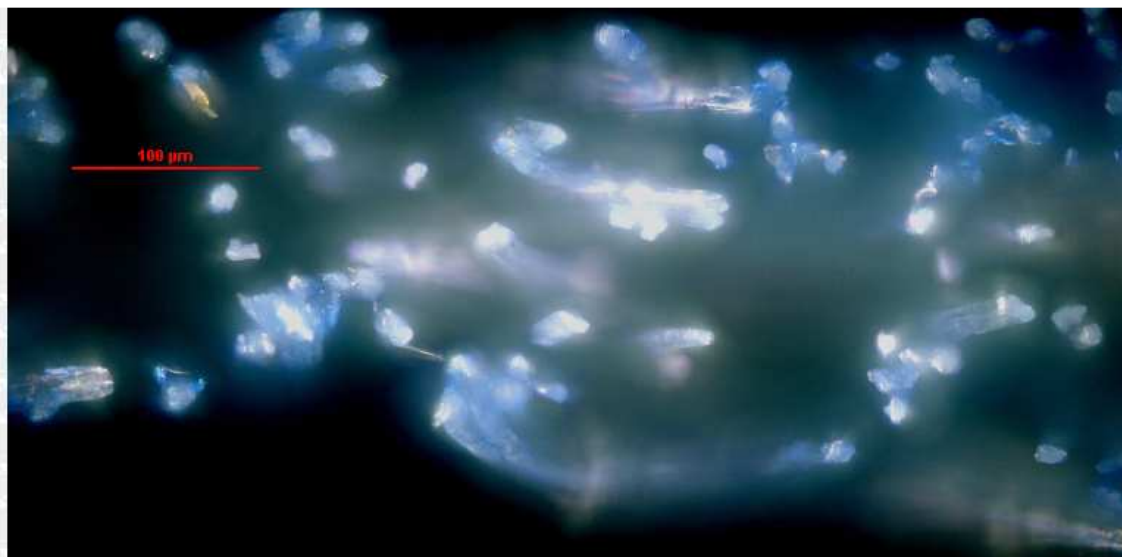
Stanovení vnitřní struktury bylo realizováno pomocí metod dostupných v rámci FT TUL Liberec. Výsledná úprava snímků byla provedena pomocí software NIS-ELEMENTS (36). Zkoumaným vzorkem byla chemicky pojená netkaná textilie z viskózových vláken, vedená pod názvem PERVIN 40. Realizované metody, v kterých byl řez vzorku/vzorek pozorován:

- Optická mikroskopie – pozorování v tmavém poli pod dopadajícím světlem.
- Laserová konfokální mikroskopie.
- MICRO-CT analýza.
- Elektronová mikroskopie.

V úvodu popisu je nutno podotknout, že každá metoda má svá opodstatnění a rovněž svá omezení. Výběr výsledné metody digitalizace textilní porózní struktury je odvislý od druhu zkoumaného materiálu a od charakteristik, které se stanovují.

2.9.1 Optická mikroskopie – pozorování pod dopadajícím světlem

Pozorování bylo provedeno na optickém metalografickém mikroskopu NIKON ECLIPSE ME 600, s kamerou DXM 1200. Použitý mikroskop dosahoval malé hloubky ostrosti – z tohoto důvodu jsou další optické roviny celkem odstíněny. Jako nevýhodu optické mikroskopie lze uvést fakt, že lze zaostřit vždy jen na jednu optickou rovinu a ostatní optické roviny do pozorované a zaostřené optické roviny vstupují (v tomto případě byl jev promítnutí více rovin z velké části eliminován). Na pozorovaném obraze se pak ostatní optické roviny projeví jako luminiscence (po odstranění nasvětlení záření pozorovaného objektu vymizí), která vytváří mlžný, rozostřený obraz kolem pozorovaných objektů. Zvětšení mikroskopu bylo nastaveno tak, aby v obraze byla vidět celá tloušťka zkoumané netkané textilie. Odpovídající obraz byl nalezen při zvětšení $200\times$. Vlastní vyhodnocení obrazu bylo provedeno v software NIS-ELEMENTS. Pixel měl rozměr na $0.17\text{ }\mu\text{m/pixel}$. Obrázek 37 ukazuje získaný obraz řezu netkané textilie PERVIN 40. Na obrázku jsou patrné luminiscence, které vznikají od ostatních optických rovin. Modrá barva luminiscencí je způsobena barvou vláken viskózy. Na obrázku je patrný obláčkovitý řez vláken, kterým se právě viskóza vyznačuje. Neostré obláčkovité kontury řezů vláken jsou způsobeny disperzním pojidlem, které obalilo vlákna viskózy.



Obrázek 37: NT PERVIN 40 pozorovaná v tmavém poli pod dopadajícím světlem při zvětšení $200\times$.

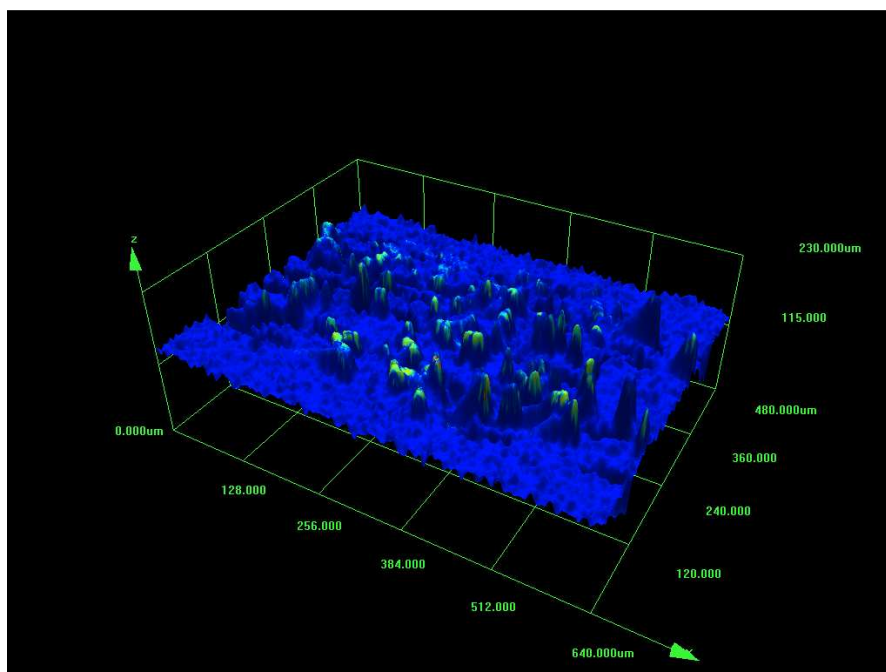
Získaný obrázek řezu struktury NT PERVIN 40 získaný optickým mikroskopem pod dopadajícím světlem v tmavém poli je zkreslen četnými luminiscencemi, proto byla hledána metoda, která by toto zkreslení eliminovala.

2.9.2 Pozorování na konfokálním rastrovacím mikroskopu

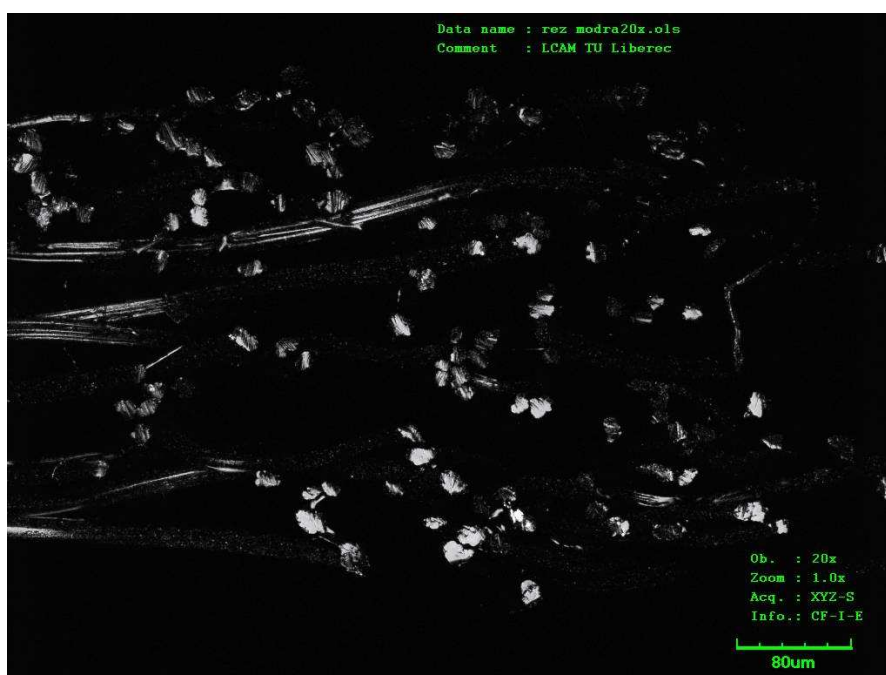
Další pozorování řezu zkoumané struktury PERVIN 40 bylo provedeno na konfokálním mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS3000. Při pořizování snímků na klasickém optickém mikroskopu dochází, jak již bylo uvedeno dříve, k luminiscenci nezaostřených optických rovin, které se do sledované a zaostřené roviny promítají. Proto bylo provedeno pozorování zkoumané textilní struktury právě touto metodou, u které nevznikají luminiscence. Konfokální mikroskop umožňuje díky vestavěným clonám snímat obraz pouze z konkrétní snímané roviny, tudíž výsledný obraz je odfiltrovaný od luminiscencí dalších rovin. Konfokální mikroskop pracuje na principu dopadajícího světla. Monochromatické (světlo jedné vlnové frekvence) světlo, zde modré barvy (modrá barva má vlnovou délku cca 475 nm – proto je mikroskop schopen větší rozlišovací schopnosti oproti klasickému optickému mikroskopu, který používá bílé světlo), dopadá na zkoumaný vzorek. Konfokální mikroskop snímá zkoumaný povrch bod po bodu (analogie s elektronovým rastrovacím mikroskopem). Dopadající světlo se z části pohltí, z části projde, z části rozptýlí a z části odrazí zpět. Právě tento odraz je indikován ccd snímačem a intenzita jasu odraženého světla je zapsána jako funkce jasu konkrétního obrazového bodu. Takto dojde k nasnímání celé roviny. Posléze dojde k přeostrění do další optické hladiny, která je oproti původní posunuta o konkrétní hodnotu (nastavitelná diference je řádově od 1 nm po 1 μ m) a znovu dojde k nasnímání celé nové posunuté roviny.

Takto je možno nasnímat řádově stovky optických rovin. Celý tento proces snímání se dělá z jednoho praktického důvodu – složením všech těchto nasnímaných rovin dojde k vytvoření a rekonstrukci tzv. reliéfu pozorovaného vzorku. Vznikne vlastně jakási plastická mapa – viz příloha 1. A.

Na obrázku 38 A je uveden reliéf řezu netkané textilie PERVIN 40 pořízený konfokálním mikroskopem. Obraz z konfokálního mikroskopu je složen z mnoha optických řezů. Průmět konkrétního optického řezu z určité výšky do roviny by pak měl odpovídat skutečnému řezu struktury. Zde bylo výše uvedeným způsobem promítnuto 20 optických rovin oddělených 10 nm a tento průmět je na obrázku 38 B. Průmět pouze jedné optické roviny neposkytl použitelný výsledek.



Obrázek 38 A: 3D pohled na řez netkanou textilií PERVIN 45.

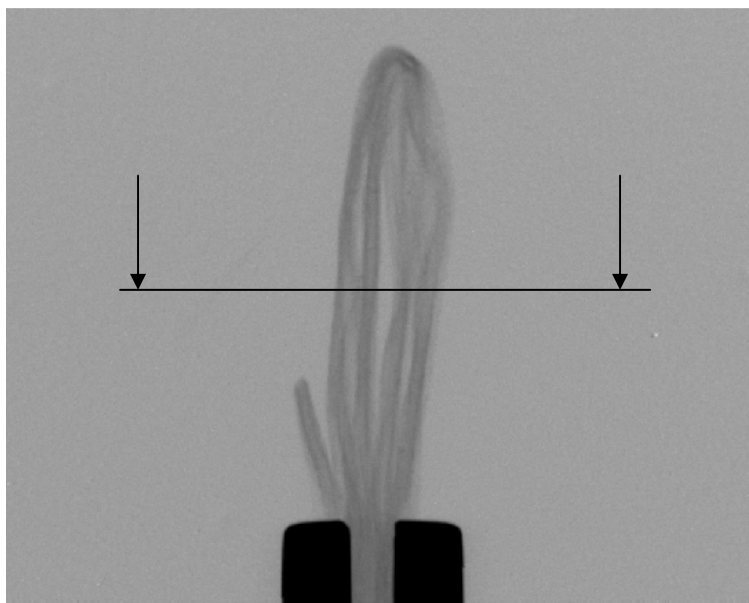


Obrázek 38 B: Průmět více optických řezů textilie PERVIN 40 do jedné roviny.

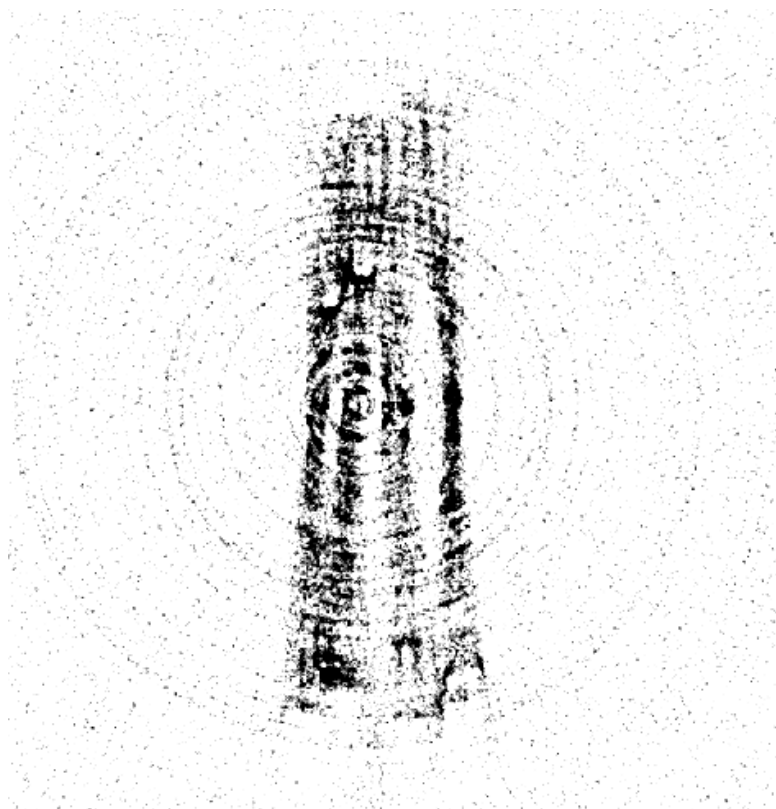
Konfokální mikroskopie se ukázala nevhodnou pro stanovení řezu zkoumané struktury. Idea byla, že pokud se obraz u konfokálního mikroskopu skládá z mnoha optických řezů – pak průmětem pouze jednoho vybraného optického řezu se dostane skutečná struktura. Toto ve skutečnosti nelze provést – výsledkem snímku z konfokálního mikroskopu je plastický reliéf struktury a separací části informace (průmět části optických řezů do jedné roviny), vzniká neúplný obraz – viz obrázek 36 B.

2.9.3 MICRO-CT analýza

Jednou z posledních metod ke stanovení vnitřní struktury byla použita neinvazivní metoda analýzy vnitřní struktury – počítačová mikrotomografie. Při použití této metody odpadá zalívání vzorku do nosného skeletu pojiva a není nutné ani vytvářet řez. Rovnou je možno zkoumat myšlenou řeznou rovinu. Obvykle se s ní pracuje všude, kde je třeba rekonstruovat 3D vnitřní strukturu. Její použití je majoritně tam, kde tvorba řezů struktury není snadno či vůbec proveditelná, nebo kde by tvorba řezů a jejich následné spojování vedly k nepřesnostem. Princip metody mikrotomografie spočívá v prozařování zkoumaného vzorku pomocí Roentgenových paprsků. Vzorek se v jejich poli otáčí s daným krokem dokola o 360°. Zpravidla je na každý stupeň otočení vzorku proveden jeden snímek. Během pořizování snímků dochází k neustálému navyšování výkonu záření až po mez, kterou si uživatel sám nastaví. Toto je z důvodu hloubky průniku paprsků. Nejprve se analyzují nejsvrchnější vrstvy a postupuje se stále hlouběji. Nakonec dojde ve speciálním software k syntéze pořízených snímků a k trojrozměrné vizualizaci zkoumané struktury. Obsluhující software je schopen také zobrazit průmět jen jednoho řezu. Vlastní zjišťování struktury bylo realizováno na přístroji SKY-SCAN 1174 MICROSCAN. Pro pozorování a vyhodnocování vnitřní struktury odpadá použitím MICROSCAN přístroje jakákoli příprava vzorků. Vzorek se pouze upne a nastaví se výkon Roentgenova záření. Čím obtížněji je proniknutelná struktura, tím větší výkon se volí. S nastavením výkonu záření je nutné experimentovat s ohledem na zkoumaný vzorek. Bohužel přístroj umožňoval maximální možné rozlišení na hranici cca 10 μm /pixel. Vlákna, která tvořila zkoumanou netkanou textilií, byla viskózní napodobenina bavlny. Jemnost bavlny se pohybuje cca kolem hodnoty 1,6 *dtex*. Tato jemnost odpovídá přibližně průměru kolem 12 μm . Z tohoto zjištění plyne, že pokud by bylo vlákno detekováno, pak by bylo tvořeno zhruba 1 pixelem. Vlastní výstup z MICRO-CT obsahuje již šum, který je pro detekci 1 pixelových objektů nepřekonatelným problémem. Obrázek 39 A ukazuje pohled na zkoumanou vrstvu. Vrstva byla v úchytu několikrát ohnuta.



Obrázek 39 A: Několikrát ohnutá zkoumaná textilie pod Roentgenovým zářením – pohled.



Obrázek 39 B: Zobrazení konkrétní řezné roviny v netkané textili PERVIN 40.

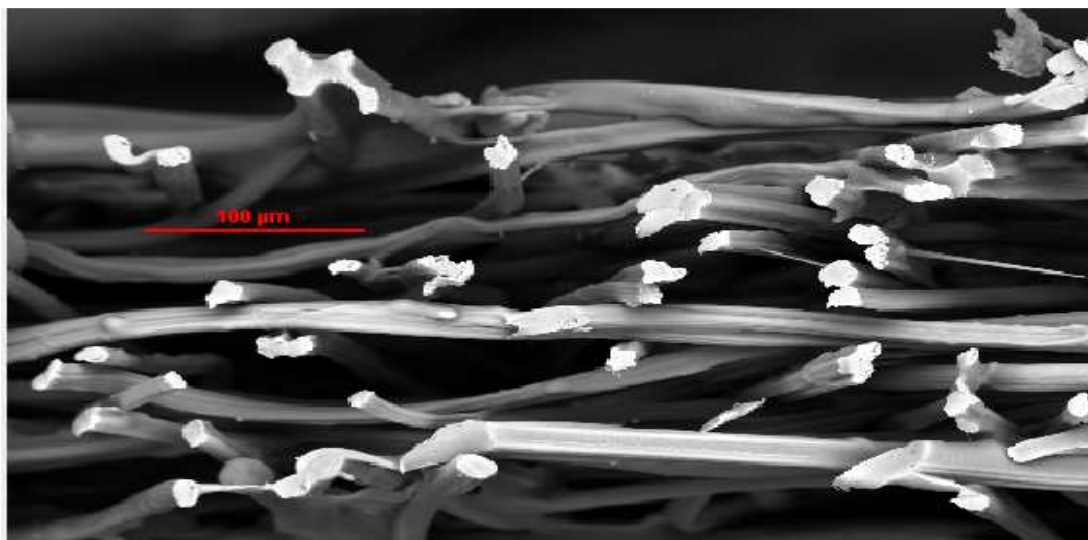
Obrázek 39 B ukazuje inverzní obraz konkrétních řezných rovin. Složením takto získaných rovin je pak možno rekonstruovat v přidaném software skutečnou vnitřní strukturu. Trojrozměrná rekonstrukce může být provedena i na klasických optických mikroskopech metodou proostřování zkoumané struktury v určitých výškových hladinách.

Zrekonstruovaný pohled pomocí software NIS-ELEMENTS je proveden na textili PERVIN 40, která byla pozorována na optickém mikroskopu NIKON ECLIPSE ME 600 – viz příloha 1B.

Potvrdilo se, že rozlišení přístroje SKYSCAN MICROSCAN 1174 není dostatečné pro analýzu vláken této konkrétní textilie. Řešením by bylo zkoumat vzorek na přístroji od stejné firmy SKYSCAN – a to přístroj NANO-CT, který je vyvinut pro analýzu a pozorování klasických vláknenných útvarů. Přístroj SKYSCAN MICROSCAN 1174 je použitelný pro zjištění struktur o velikosti cca 1 mm. Pro ilustraci byl nasnímán vzorek výztužných vláken o průměru cca 1 mm, které se používají např. pro výztuže zádoových partií batohů, apod. U takového vzorku dává již přístroj SKYSCAN MICROSCAN 1174 použitelný výsledek – viz příloha 1 C.

2.9.4 Elektronová rastrovací mikroskopie

Poslední použitou metodou ke stanovení vnitřní struktury netkané textilie PERVIN 40 byl použit elektronový rastrovací mikroskop VEGA-TESCAN. Princip tohoto mikroskopu spočívá ve vysílání svazku elektronů, které se vychylují elektromagneticky v tubusu mikroskopu. Dopadající paprsek se od zkoumaného objektu odrazí a emisní čidla tento odraz elektronů zachytí. Čím větší odraz – tím jasněji se objekt jeví. Pojem rastrovací značí, že paprsek dopadá na povrch jen v jednom bodě. Získaná informace z jednoho dopadu svazku elektronů je tedy jen jeden bod (pixel). Aby byl nasnímán celý povrch, je potřeba odklánět paprsek dopadajících elektronů – rastrovat bod po bodu celý objekt. Výslednou získanou vnitřní strukturu ukazuje obrázek 38.

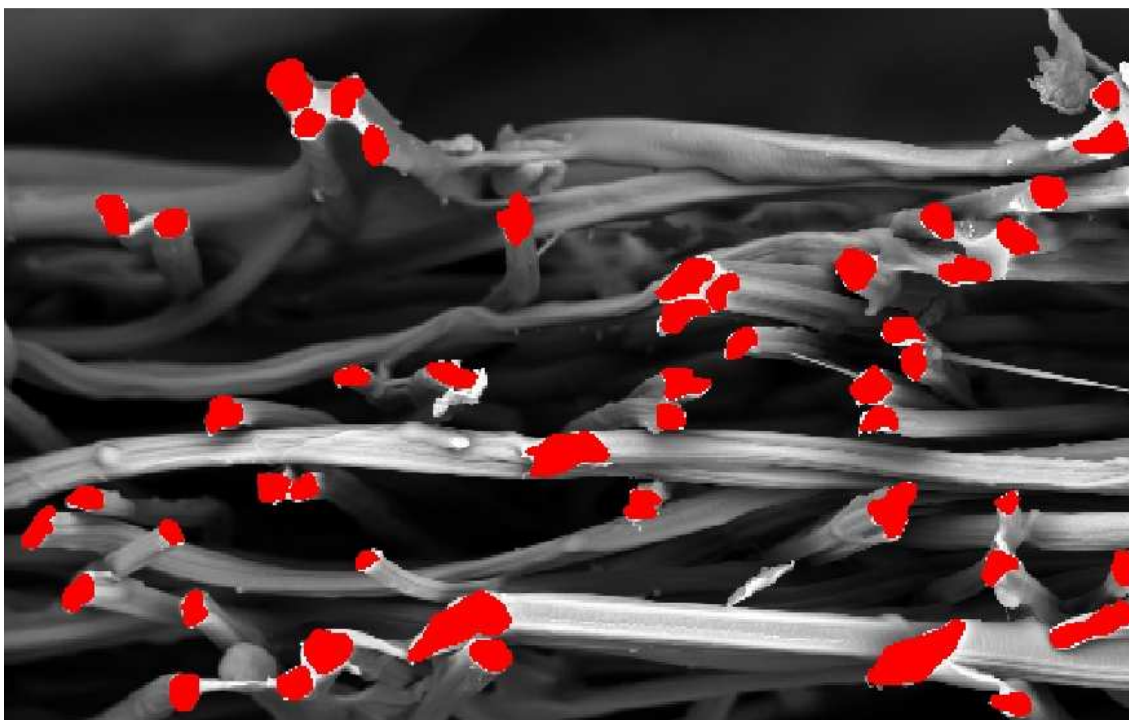


Obrázek 40: Řez textilie PERVIN 40, zobrazení elektronovým mikroskopem při zvětšení 300 ×.

Takto získané zobrazení vnitřní struktury je bez rušivých luminiscencí a průřez vláken v řezu je dobře viditelný, proto lze obrázek 40 považovat za přibližnou hledanou vnitřní strukturu textilie PERVIN 40. Kontury průřezů vláken nemusí ovšem ležet v jedné rovině!

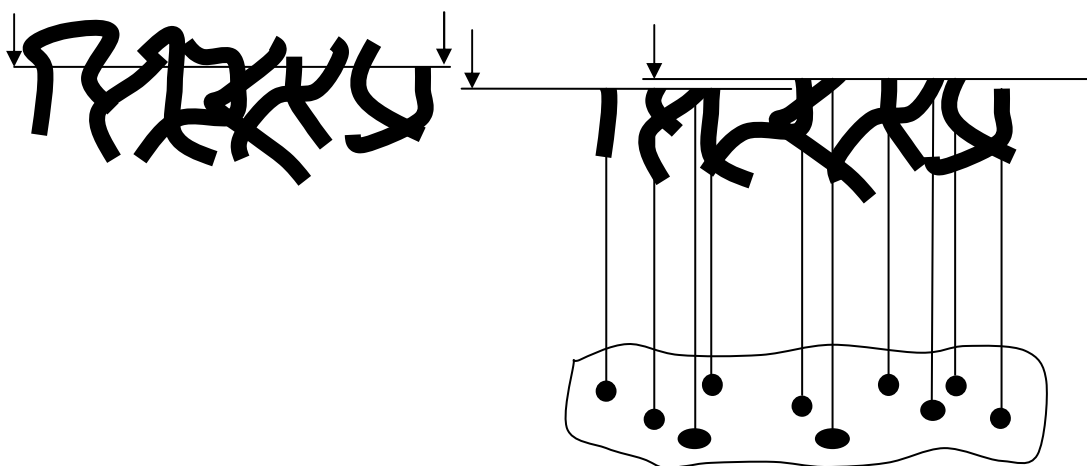
2.10 Výsledek digitalizace reálné textilní struktury

Pro stanovení vnitřního uspořádání byl jako základ použit snímek pořízený elektronovým rastrovacím mikroskopem, jak byl uveden na obrázku 38. Pomocí obrazové analýzy NIS-ELEMENTS byly ručně pomocí Béziérových křivek zvýrazněny obrysy vláken přítomných v řezu. Uvedené ruční obkreslení struktur je silně individuální a záleží na osobě, která tuto činnost provádí, zda má apriorní informaci o typu vláken, zkušenosti... Nalezení automatického postupu, který by vyhodnotil a označil strukturu průřezu vláken na základě jasů struktury, nebylo možno provést, protože hodnota jasů průřezů vláken je podobná s hodnotou jasů příčně kladených vláken, která však již nejsou v řezné rovině. Z tohoto důvodu je nutná ruční práce. Obrázek 41 ukazuje obkreslení kontur vláken. V následujících obrázcích chybí měřítko z důvodu dalšího zpracování, ale jinak je měřítko totožné s měřítkem na obrázku 40.



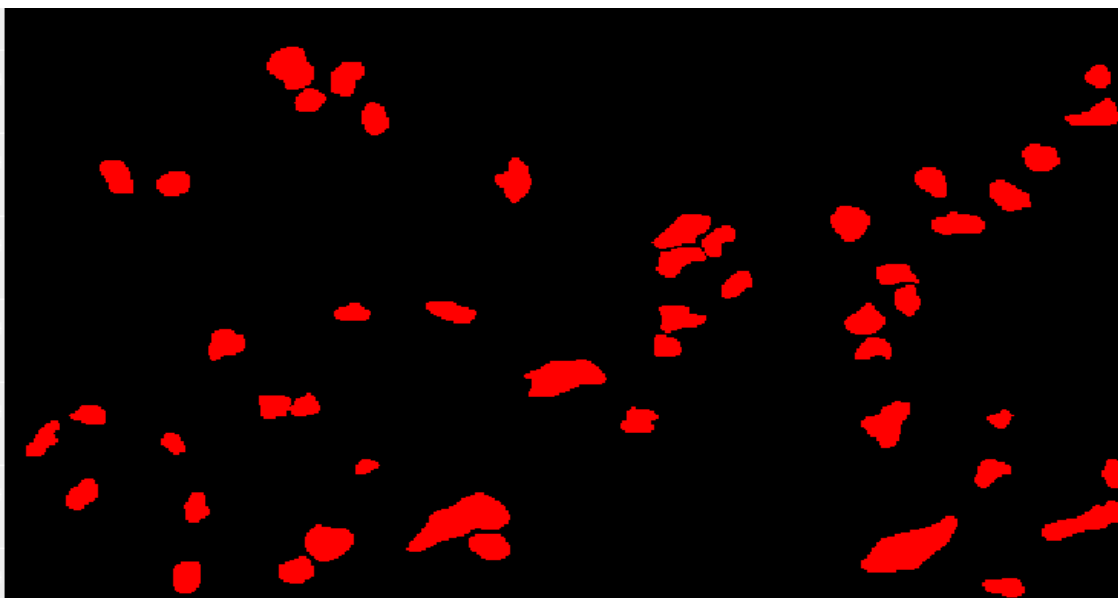
Obrázek 41: Zvýraznění průřezů vláken textilie PERVIN 40 zvětšeno 300 ×.

Takto provedené obkreslení kontur průřezů vláken nemusí odpovídat skutečnému řezu vláken v jedné rovině (je možné, že zvýrazněné řezy nejsou všechny ve stejné výšce)! Zde se však pro zjednodušení předpokládá, že provedeným řezem byla oddělená vrstva právě v jedné rovině. Obrázek 42 ukazuje možný průmět více rovin do jedné.



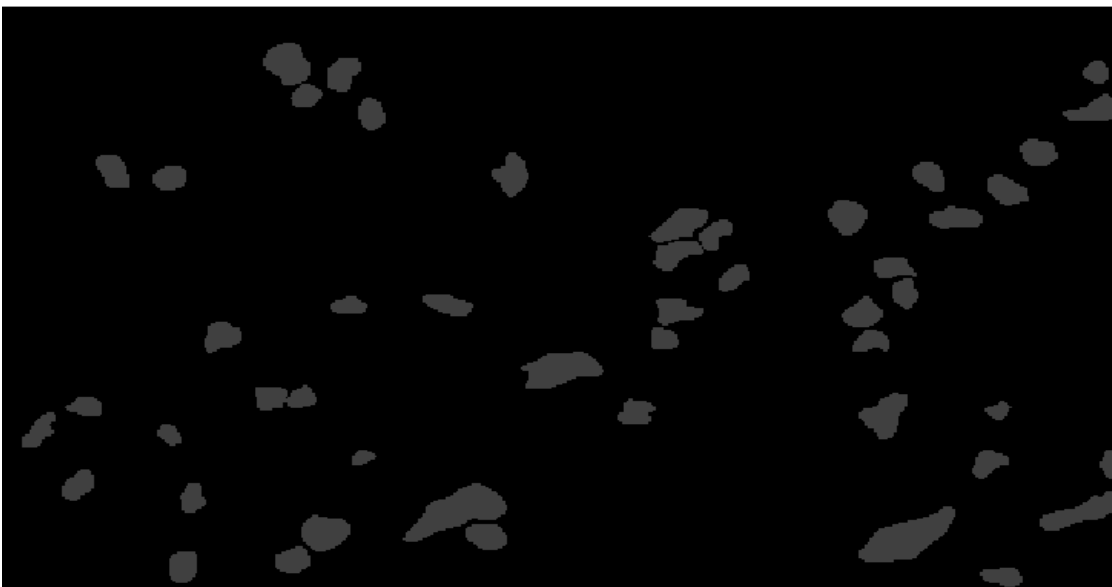
Obrázek 42: Nebezpečí průmětu více řezných rovin do jedné roviny.

Elektronový rastrovací mikroskop TESCAN VEGA pořizuje snímky v rozlišení pouze 512×512 pixelů. Obraz se skládá z relativně malého počtu pixelů – řešením by bylo pořídit snímek ve větším rozlišení. Pro potlačení pozadí a zvýraznění reliéfu obkreslených vláken bylo potřeba odprahovat hodnotu kontrastu obrázku. Výsledek odprahovaného kontrastu ukazuje obrázek 43.



Obrázek 43: Zvýraznění obkresleného reliéfu pomocí úpravy kontrastu, zvětšeno $300 \times$.

Zvýrazněný reliéf se posléze převedl do monochromatické barvy. Výsledek ukazuje obrázek 44.



Obrázek 44: Převod obrázku do stupně šedi, zvětšeno $300 \times$.

Obrázek 45 ukazuje převod obrázku ze stupně šedi do černobílého obrázku metodou prahování.



Obrázek 45: Převod obrázku do černobílého zobrazení, zvětšeno 300 ×.

Aby mohla zvýrazněná vlákna sloužit jako překážky a nikoli prázdná místa, je nutné ještě provést inverzi obrázu. Získaná inverze je na obrázku 46.



Obrázek 46: Inverze obrázku 43, zvětšeno 300 ×.

2.11 Diskuse použitého postupu digitalizace

Kvůli možnosti vidět průchozí póry textilní struktury byly analyzovány právě netkané textilie – tkaniny a pleteniny takto průchozí pór zpravidla vidět neumožní. Získaný obrázek skutečné vnitřní struktury textilie lze již použít např. ke stanovení zaplnění μ nebo poróznosti ψ zkoumané textilie, popřípadě k modelování či simulování např. transportních jevů skrz tuto textilní vrstvu. Takto vytvořený postup tvorby a digitalizace porózní struktury však nemůže být považován za univerzálně platný. Konkrétně při digitalizaci netkané textilie PERVIN 40 bylo uvažováno mnoho zjednodušujících předpokladů. Zde lze vyjmenovat např.: příprava řezu bez zalití do nosné struktury (netkané textilie, jak již bylo uvedeno, zalití do nosného preparátu zpravidla neumožní), shodné uspořádání vláken ve vzorku nezávisle na natočení vzorku, zachování uspořádání vnitřní struktury i po provedení řezu... Rovněž práce se získaným řezem – obkreslení kontur vláken nemůže být považováno za přesný stav vnitřní struktury. Jak již bylo uvedeno, není při ručním obkreslení zaručeno, že všechny obkreslené kontury průřezů vláken budou ze stejné řezné roviny. Vlastní obkreslení kontur vláken generuje v získaném obrázku také individuální chybu. Každý, kdo by získanou strukturu zvýrazňoval, by ji nepochybně označil jinak než ten, kdo by ji označoval následně.

Použité mikroskopické metody nasnímáním struktury lze považovat za přijatelné a vhodné z důvodu, že jiné nebyly nalezeny. Elektronová mikroskopie se ukázala k získání snímků tohoto typu struktur jako nejvhodnější metoda.

Při použití metody elektronové mikroskopie lze za nedostatek považovat fakt, že nebyla zajištěna dokonalá kolmost provedeného řezu vzhledem k směru pozorování. Před vlastním provedením řezů byly analyzovány i jiné struktury netkaných textilií – odlišné především svojí technologií výroby a jemností vláken. Pro navržený postup řezů bylo zjištěno, že struktury tvořené vlákny, které dosahují jemností nižších než je cca bavlnářský typ vlákna, již není možné použitým způsobem řezat. Rovněž soudržnost vláknenné struktury musí být cca shodná s použitou zkoumanou textilií (zkoumaná textilie PERVIN 40 byla chemicky pojena, což bylo velice žádoucí pro tvorbu řezů). V opačném případě se řezy použitou metodou nemusí podařit – dochází k vytahování vláken ze struktury a k deformaci vnitřního uspořádání. Proto navržená velikost struktury – tloušťka vzorku cca 0,25 mm tvořená vlákny bavlnářského typu může být považována za optimální. Také byl proveden pokus tvorby řezu nanovláknenné vrstvy pomocí žiletky, ale jednoduše

řečeno, i čepel nejostřejší žiletky představuje oproti nanovláknům pouze tupou, širokou plochu, která řezanou vrstvu nanovláken pouze roztrhne (zpravidla nedojde k vytvoření žádného řezu konkrétního nanovlákná).

Pro další zkoumání a digitalizaci vnitřní struktury vláknenných struktur lze doporučit zkoumání vnitřní struktury např. pomocí nanotomografie např. přístrojem SKYSCAN NANOSCAN. Při použití této technologie by byl získaný výsledek bez deformací, které způsobí provedení řezů. Zkoumaný postup pomocí metody mikrotomografie se ukázal jako nejlepší možný, pokud by analyzovaná struktura byla tvořena hrubšími vlákny. Pro ukázkou lze uvést přílohu 1 C. Proto by výsledek nanotomografie mohl dát uspokojivý výsledek.

Při použití klasických optických způsobů získání struktury by bylo vhodné provést řez zkoumané struktury bez zalití vzorku – zalití většinou silně ovlivní zkoumanou textilní netkanou strukturu. Jako vhodný způsob by mohla být použita technologie řezání iontovým paprskem nebo metoda zmrazení vzorků pod teplotu zkřehnutí materiálu a provedení lomu, apod. Klasické způsoby řezání pomocí ostrých ploch žiletek, apod. nelze obecně doporučit kvůli ovlivnění řezaných struktur.

3 POROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK ZKOUMANÉ TEXTILNÍ STRUKTURY RŮZNÝMI METODAMI

Aby mohly být porovnány výsledky porózy ψ (volná plocha) a zaplnění μ (zakrytá plocha) zjištěné z obrazové analýzy s metodou zjištění porózy ψ přístrojem METEFEM – kapitola 2.6 a metodu vážením vzorků – kapitola 2.4., byl vytvořen vlastní, níže uvedený skript v prostředí MatLab k určení parametrů porózy a zaplnění z obrazové analýzy.

```
A=imread('A.jpg'); % načtení obrázku do proměnné A
B=rgb2gray(A); % převod obrázku do stupně šedi
C=im2bw(B,100/255); % převod do černobílého obrázku
D=size(C); % výpočet počtu řádků a sloupků černobílého obrázku
ST=D(1)*D(2); % výpočet velikosti černobílého obrázku
S=sum(C,1); % součet všech černých bitů přes všechny řádky
SB=sum(S,2); % součet všech černých bitů přes všechny sloupky
P=SB/ST*100; % stanovení porózy načteného obrázku
Z=(100-P); % stanovení zaplnění načteného obrázku
Plocha_procento=struct('Volna_plocha(porózita)',{P},'Zakryta_plocha'(Z))
```

Volná_plocha (porózita): 93.4387 %

Zakrytá_plocha (zaplnění): 6.5613 %

Výpis zjištěných hodnot zaplnění a porózy různými metodami uvádí tabulka 6.

Tabulka 6 – zjištěné parametry netkané textilie PERVIN 40 různými metodami.

Porózyta ψ a zaplnění μ textilie PERVIN 40 zjištěné různými metodami			
Metoda	Obrazová analýza řezu	Metoda vážením vzorku	Metoda měření prodyšnosti přístrojem METEFEM
Zjištěná porózyta ψ %	93.438	89.8	90
Zjištěné zaplnění μ %	6.562	10.2	10

Zjištěné parametry zaplnění μ a porózy ψ z řezu netkané textilie PERVIN 40, zjištěné obrazovou analýzou, se odlišují od hodnot získaných metodou vážení vzorku a metodou měření prodyšnosti přístrojem METEFEM. Rozdíl hodnot *v zaplnění μ mezi obrazovou analýzou a metodou vážení vzorku nebo metodou měření prodyšnosti přístrojem METEFEM* je třeba hledat v analýze jen jednoho řezu – v získaném řezu zkoumané textilní struktury se všechna vlákna jeví jako kolmo orientovaná. Vlákna, která byla orientovaná podélně s provedeným řezem, mohla být při tvorbě řezu odsunuta mimo řeznou rovinu. Proto nebyla do zjištěného řezu zahrnuta. Ale v obecném řezu by se do myšlené řezné roviny mohla dostat i vlákna, která jsou orientovaná podélně s řezem (nikoli pouze zvýrazněná vlákna kolmo orientovaná k myšlenému řezu). Pak by se hodnoty zaplnění a porózy zjištěné z řezů obrazovou analýzou blížily hodnotám zjištěným dalšími použitými metodami. Proto je třeba pokládat reálné zaplnění μ zkoumané textilie PERVIN 40 cca kolem 10 %.

ZÁVĚR

Práce se zabývala navržením postupu digitalizace porózní struktury. Jako model pro vizualizaci byla zvolena struktura netkané textilie. Předložený postup vizualizace textilní struktury se ukázal být možným vhodným způsobem, jak zjistit vnitřní strukturu téměř libovolného druhu textilie. Jak je z této práce patrné, navržený postup vizualizace pro všechny typy textilních struktur bude téměř identický. Rozdíly lze nalézt pouze při úpravě zkoumaných textilií (například tvorbě řezu) a focení vzorků (volba vhodné optické metody). Provedený experiment byl omezen především jemností vláken zkoumané struktury a její soudržností. Měřítka, pod které již provedenou metodu zjištění vnitřní struktury nelze aplikovat, představují textilní struktury o jemnosti vláken nižší než je cca jemnost bavlněných vláken. Dalším problémem je soudržnost zkoumané vrstvy. Zkoumaná netkaná textilie PERVIN 40 dosahovala poměrně slušné soudržnosti díky disperznímu pojivu (také termicky spojené netkané textilie dosahují dostatečné soudržnosti pro použitou metodu). Ovšem struktury zpevněné vpichováním nebo paprskem vody se při tvorbě řezu deformují a proveditelnost kvalitních řezů je použitou metodou nemožná.

Předložený postup digitalizace struktury textilie by se dal shrnout v následujících bodech. Protože se předpokládá digitální výstup pro simulaci transportních jevů přes porózní strukturu – nejprve byl proveden řez zkoumaného textilie. Pro konkrétní typ textilie bylo přistoupeno k tvorbě řezu vzorku bez zalití nosným prostředkem (pryskyřice, disperzní pojivo). Při přípravě řezů se uvažovalo, že deformace nebo zkreslení způsobené zalitím vzorku bude větší než pouhé vytvoření řezu bez zalití. Jako důkaz byl zkoumaný vzorek zalit do disperzního pojiva a podroben nasnímání. Výsledek z tohoto experimentu ukázal, že vnitřní struktura zalitého vzorku neodpovídala skutečné, co se týká velikosti pórů. Řez textilií byl následně nasnímán metodou elektronové mikroskopie (byly použity i další metody, ale metoda elektronové mikroskopie se ukázala jako nejvhodnější z dostupných metod). Takto získaný obraz (kvůli podobným jasovým intenzitám pozadí a řezů vláken) musel být ruční cestou upraven tak, aby byla zvýrazněna průřezová rovina vláken. Toto zvýraznění bylo provedeno v obrazové analýze NIS ELEMENTS. Byly použity Béziérový křivky, kterými byly zvýrazněny kontury vláken. Při tomto ručním obkreslení kontur mohlo dojít k chybám – takže zvýrazněná struktura již nemusela plně odpovídat struktuře zobrazené v řezu. Dále bylo v takto obkresleném získaném obraze struktury pomocí prahování kontrastů obrázku odstíněno pozadí – došlo k vytažení pouze obkreslených

kontur. Tyto kontury průřezů vláken byly barevné – z tohoto důvodu se provedla transformace do stupně šedi a následně po zobrazení histogramu stupně šedi se zvolil vhodný práh k převodu do černobílého obrázku. Posledním krokem byla inverze obrazové informace – zobrazení průřezů vláken jako černých míst a zobrazení volných míst jako bílých míst. Výstupem digitalizované porézní struktury byla dvojbitová matice, která ve svých sloupcích a řádcích obsahovala hodnoty 0 a 1. Pokud veličina v místě matice, popsané souřadnicemi (x, y) se rovnala 1 (bílá), tak konkrétní pozice (poloha) v reálné struktuře náležela póru a naopak v případě hodnoty 0 (černá) byla konkrétní pozice označena jako pevná část (vlákno). Bez dalších úprav lze získaný binární obraz použít v algoritmu určeného pro simulaci transportních jevů porézními strukturami. V tomto případě se na místo simulačního pole, určeného pro porézní strukturu, nahraje získaná matice, reprezentovaná binárním obrazem. Dále byla z takto získaného finálního snímku stanovena přibližná poróznost a zaplnění. Tyto charakteristiky byly ještě v práci zároveň ověřeny analytickou metodou na základě známé hmotnosti vzorku a hustoty vláken, dále pak analýzou prodyšnosti pomocí přístroje METEFEM. Výsledky získané vážením vzorku a analýzou prodyšnosti dávají velice podobné výsledky. Hodnota zjištěná z řezu vykazuje nižší hodnotu zaplnění oproti předcházejícím metodám. Důvodem může být přítomnost disperzního pojiva ve struktuře, nepřesnosti ve stanovení průřezů vláken v řezu a analýza pouze jednoho řezu zkoumané textilie. Do budoucna by bylo vhodné zkoumat vnitřní uspořádání textilních struktur např. metodou nanotomografie, která nevyžaduje přípravu řezů a proto nedochází k ovlivnění vnitřní struktury.

BIBLIOGRAFIE

1. **Bear, J.** *Dynamics of fluids in porous media*. Israel : Dover Publications (September 1, 1988), 1988. stránky 12-15. ISBN-13: 978-0486656755.
2. **Meinzer, O., E.** *Hydrology*. New York : Dover Publications, 1942. stránky 18-20.
3. **Granger, A., R.** *Fluid mechanics*. New-York : Dover publications, inc., 1995. stránky 203-208. ISBN 0-486-68356.
4. **Schneider, P.** Textura porézních látek. *Ústav chemických procesů AV ČR*. [Online] 2007. [Citace: 21. 11 2009.] <http://www.icpf.cas.cz/transtex/textbooks/Skripta-textura%202007.pdf>.
5. **KNT.** KNT department of nonwovens. *Downloads / Studium*. [Online] [Citace: 11. Březen 2010.] http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/web/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=53&Itemid=36.
6. —. Hlavní strana. *depart/knt/web*. [Online] [Citace: 12. Prosinec 2009.] <http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/web/index.php>.
7. **KTT.** KTT. *Katedra textilních technologií, Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci*. [Online] [Citace: 01. 12 2009.] Řezy získané z KTT FT TUL. <http://www.ft.tul.cz/depart/ktt/index.htm>.
8. **Neckář, Bohuslav.** *Vlákna a vláknenné útvary 1*. místo neznámé : Učební text – Struktura a vlastnosti textilií, TU Liberec, katedra textilních technologií.
9. **Zdravkov, B a kol, a.** Kategorizace pórů v porézních maticích. *Chem. Listy 102, 434–438 (2008)*. [Online] 22. 11 2007. [Citace: 21. 11 2009.] http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2008_06_434-438.pdf.
10. **Dubinín, M. M.** *Proc Acad Sci*. Moscow : Dubinín, M. M., 1979.
11. **VSCHT.** lab_porozimetrie.doc. *vscht.cz*. [Online] [Citace: 05. 12 2009.] www.vsch.cz/kat/download/lab_porozimetrie.doc.
12. **International Union of Pure and Applied Chemistry.** *Physical Chemistry Manual of Symbols and Terminology*. London : Butterworths, 1972.
13. **KNT.** TPA. *depart/knt/web*. [Online] [Citace: 02. 12 2009.] http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/web/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=53&Itemid=36.
14. **Millipore.** bubble_point. *Millipore - Bubble Point*. [Online] [Citace: 02. 12 2009.] http://www.millipore.com/membrane/mrc3/bubble_point.
15. **Micromeritics.** Low pressure porosimetry. *Particle Characterization Analysis*. [Online] [Citace: 08. 12 2009.]

http://www.micromeritics.com/Repository/Files/A_Few_Facts_Pertaining_to_the_Low_Pressure_Performance_of_a_Mercury_Intrusion_Porosimeter.pdf.

16. **Moura, M.J. a Figueiredo, M.M.** Characterization_of_Eucalypt_Wood_by_Mercury. *micromeritics.com*. [Online] [Citace: 05. 12 2009.]

http://www.micromeritics.com/Repository/Files/Characterization_of_Eucalypt_Wood_by_Mercury_Porosimetry_-_DataInterpretation.pdf.

17. **Kfupm.** PETE2045152/Exp.02.pdf. *ocw.kfupm.edu.sa*. [Online] [Citace: 08. 12 2009.] <http://ocw.kfupm.edu.sa/user/PETE2045152/Exp.02.pdf>.

18. **Lepil, O.** *Malý lexikon fyziky*. Praha : Nakladatelství Prometheus, 1995. stránky 41-42. ISBN 80-85849-77-1.

19. **Hes, Lubomír.** *Přenosové jevy v textiliích*. Liberec : Hes, Lubomír, 2003.

20. **Hruš, T.** *Základy metody konečných prvků*. 1. vydání. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-896-5.

21. **COMSOL AB.** Company. *comsol.com*. [Online] [Citace: 25. 11 2009.] <http://www.comsol.com/company/>.

22. **COMSOL AB.** Showroom/gallery/691/. *Comsol*. [Online] [Citace: 24. 11 2009.] <http://www.comsol.com/showroom/documentation/model/691/>.

23. **COMSOL.** Multiphysics. *comsol.com*. [Online] [Citace: 25. 11 2009.] <http://www.comsol.com/products/multiphysics/>.

24. **Ansys.** Fluid Dynamics Solutions. *Ansys.com*. [Online] [Citace: 10. 01 2010.] <http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/default.asp>.

25. *Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa*. **Kosek, Miloslav, Mikolanda, Tomas a Koskova, Bohumila**. NY : ACM, 2004. Ideal, real and virtual textile structure modelling and visualization. stránky 49 - 54. ISBN:1-58113-863-6 .

26. **Lomov, Stepan a Verpoest, Ignaas.** WiseTex – virtual textile reinforcement software. *Departement Metaalkunde en Toegepaste Materiaalkunde*. [Online] [Citace: 22. Březen 2010.] http://www.mtm.kuleuven.be/Research/C2/poly/research/textile_modelling/textile_geometry_modelling_paper_sl.pdf.

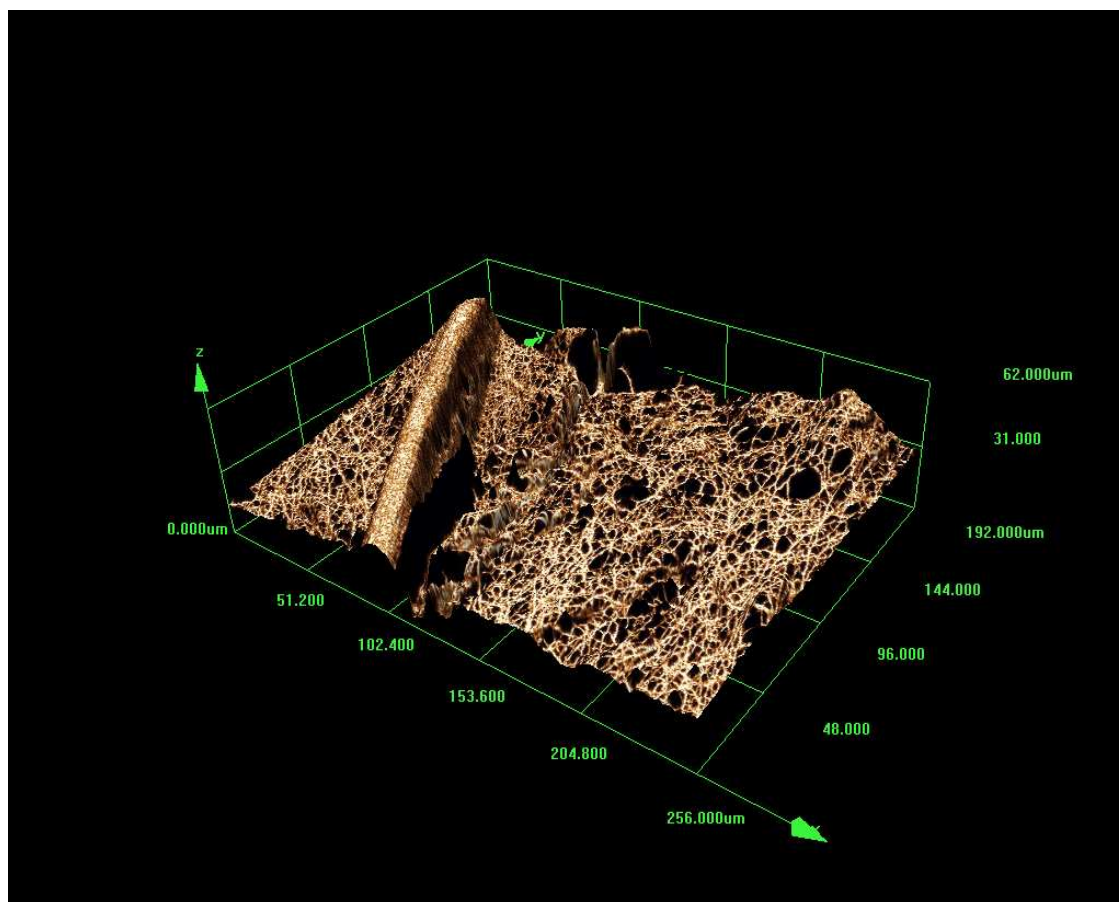
27. **Yang, Y., a další.** A statistical model for porous structure of rocks. *Science in China Series E: Technological Science*. 51, 2008, 11, stránky 2040-2058.

28. **MatLab.** The language of technical computing. *MatLab*. [Online] [Citace: 21. 11 2009.] <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.

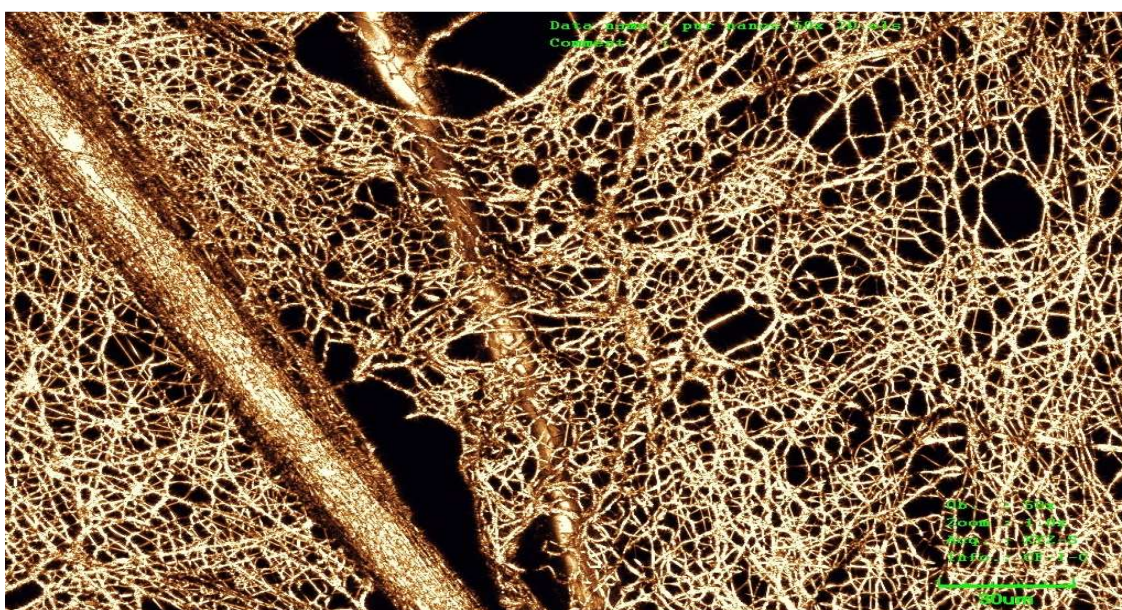
29. **Gonzales, C.R, Woods, E.R. a Eddins, L.S.** *Digital Image Processing Using MATLAB*. New-York : Addison-Wesley Pub (Sd), 2007. stránky 2-5. ISBN 0-201 50803-6.

30. **Wikipedia.** CCD. *cs.Wikipedia.org*. [Online] [Citace: 31. Leden 2010.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>.
31. **Perla.** Sortiment. *Perla - Netkaný textil*. [Online] [Citace: 11. Březen 2010.] <http://www.pervin.cz/sortiment>.
32. **Lenzing.** Viscose sets the industry standard. *Lenzing Viscose® - Lenzing Viscose®*. [Online] [Citace: 11. Březen 2010.] <http://www.viscose.at/index.php?id=89>.
33. **Jirsák, O. a Kalinová, K.** *Netkané Textilie*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2003. stránky 65-67. ISBN 80-7083-746-2.
34. **Tunák, Maroš a Linka, Aleš.** *Analysis of Planar Anisotropy of Fibre Systems by using 2D Fourier Transform*. Liberec : Tunák, Maroš; Linka, Aleš, 2007. stránky No. 5-6 (64-65). ISSN 1230-3666.
35. **Tunák, Maroš.** *Anizotropie*. [Funkce v MaTlab] Liberec : Tunák, Maroš, 2009. AnisotropyFT.mat.
36. **Laboratory imaging.** NIS - elements — Produkty. *Systémy analýzy obrazu*. [Online] [Citace: 17. Březen 2010.] <http://www.nis-elements.cz/produkty/nise-ar>.

Příloha 1 A – výstup z konfokálního mikroskopu

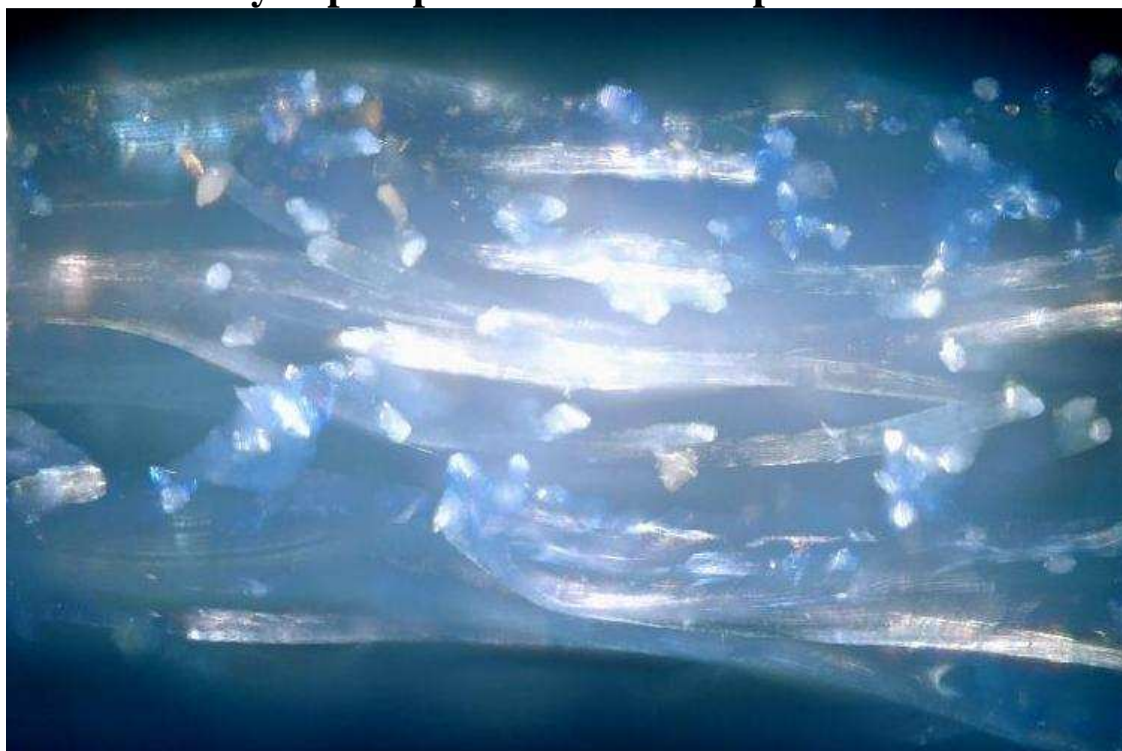


Textilie nasnímaná pod konfokálním mikroskopem – viditelná plastičnost (reliéf).



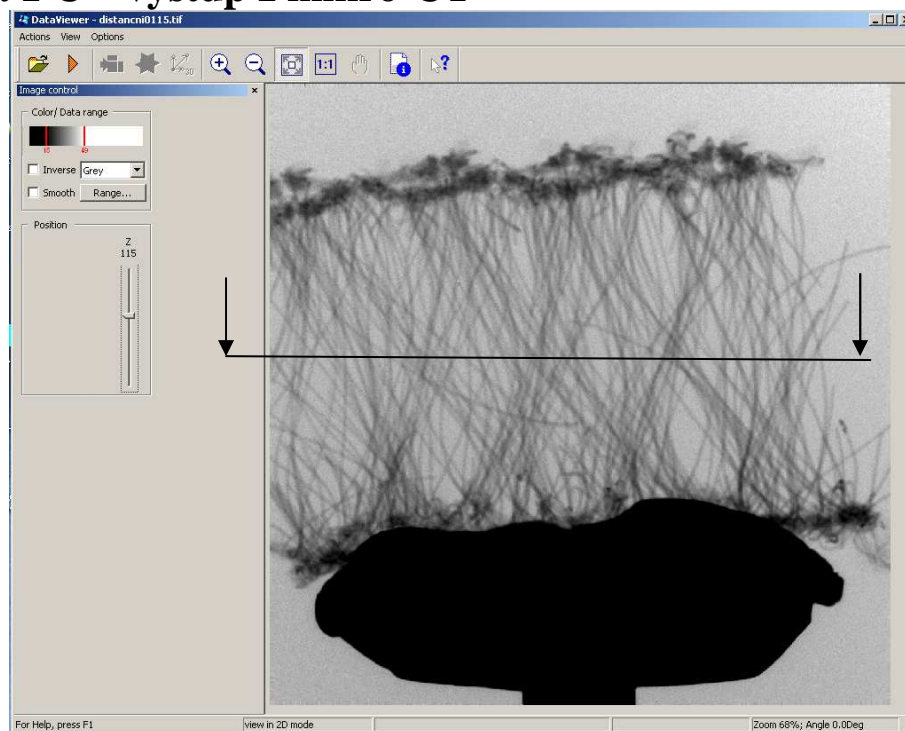
Detail struktury textilie pod konfokálním mikroskopem.

Příloha 1 B – výstup z optického mikroskopu

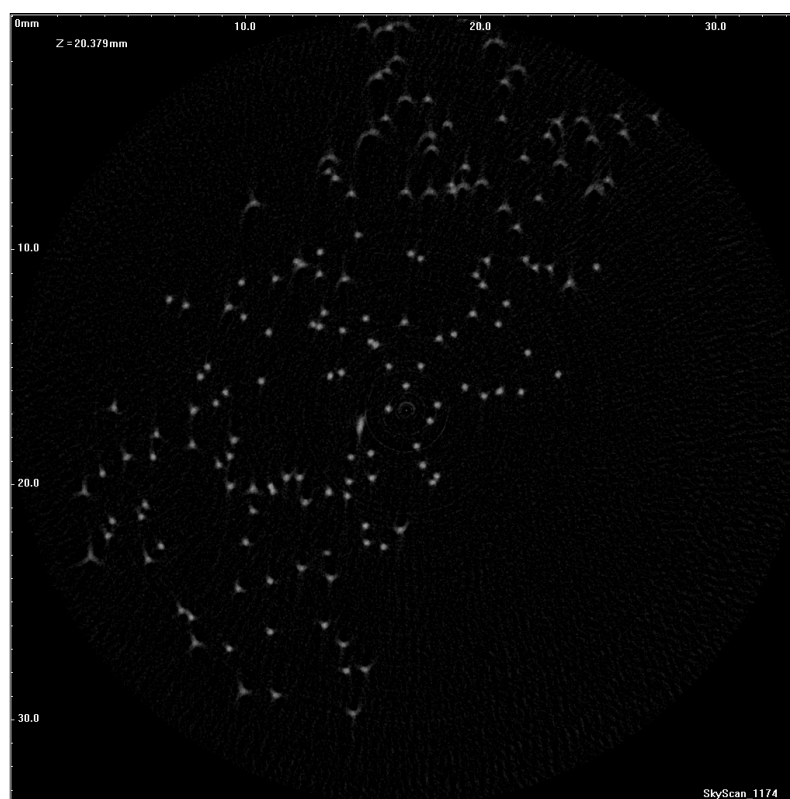


3D vizuální rekonstrukce řezu textilie PERVIN 40 metodou proostřování na optickém mikroskopu.

Příloha 1 C – výstup z mikro-CT



Výstužná část batohu – jako pružný element je zde použito PA vláken o průměru cca 1 mm. Obraz získán přístrojem SKYSCAN 1174. Zobrazení řezné roviny – šipkami.



Zobrazení řezné roviny výstužné části batohu přístrojem SKYSCAN 1174.

Název souboru: Diplomová práce
Adresář: D:\Users\ZDENDA\Desktop
Šablona: D:\Users\ZDENDA\AppData\Roaming\Microsoft\Šablony\Normal.dotm
Název: Digitalizace porózních struktur
Předmět:
Autor: Zdeněk Podrazil
Klíčová slova:
Komentáře:
Datum vytvoření: 23.4.2010 20:18:00
Číslo revize: 21
Poslední uložení: 26.4.2010 18:27:00
Uložil: ZDENDA
Celková doba úprav: 150 min.
Poslední tisk: 26.4.2010 21:38:00
Jako poslední úplný tisk
Počet stránek: 80
Počet slov: 16 308 (přibližně)
Počet znaků: 96 224 (přibližně)